

А.А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано учебно-методическим советом
университета «Дубна» в качестве учебного пособия
для студентов университета «Дубна», обучающихся по направлению подготовки
«Автоматизация технологических процессов и производств»
(бакалавриат)



Дубна
2020

УДК 62-52
ББК 31.291.63я73
Е 25-5

Р е ц е н з е н т :

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий им. А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

В.С. Селезнев

Евсиков, А. А.

Е 25 Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А.А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. — Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. — 121 [1] с.

ISBN 978-5-89847-592-5

Изложен материал, формирующий у студентов знания и навыки, необходимые для проектирования, модернизации и эксплуатации автоматизированных электроприводов с частотным управлением, включая интеллектуальные мехатронные модули. Систематизирована информация об имеющихся наиболее широкое применение трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, трехфазных синхронных и шаговых двигателях, о перспективных вентильных и вентильно-индукторных двигателях. Рассмотрены принципы скалярного и векторного управления двигателями, техническая реализация преобразователей частоты (ПЧ) в АЭП переменного тока, включая практические схемы ПЧ с автономными инверторами напряжения и тока. Приведена методика и примеры выбора ПЧ по энергетической совместимости с двигателями.

Систематизирована информация по отечественным сервоприводам типов СПС 25 и СПШ, выполненным на базе мехатронных модулей линейных перемещений, по системам управления ими, включая графический интерфейс *МотоМастер*©, разработку прикладных программ для встроенного ПЛК на языке *SML*.

Приведены методические указания по выполнению трех лабораторных работ на стендах лаборатории автоматизации, организованных на базе двух комплектных сервоприводов СПС 25 и интегрированного сервопривода СПШ20-34100.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств» (бакалавриат).

УДК 62-52
ББК 31.291.63я73

ISBN 978-5-89847-592-5

© Государственный университет «Дубна», 2020
© Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П., 2020

Содержание

Введение	5
1. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.....	7
1.3.1. Регулирование скорости АД изменением величины напряжения на обмотке статора	14
1.3.2. Регулирование скорости АД изменением числа пар полюсов	15
1.3.3. Регулирование скорости АД изменением частоты напряжения на обмотке статора	16
1.4. Торможение и реверс АД.....	19
1.4.1. Торможение противовключением и реверс	19
1.4.2. Рекуперативное торможение.....	20
1.4.3. Динамическое торможение	20
1.5. Скалярное и векторное управление двигателями переменного тока.....	22
1.5.1. Скалярное управление	22
1.5.2. Векторное управление	23
2. Техническая реализация преобразователей частоты в АЭП переменного тока	29
2.1. Преобразователи частоты с непосредственной связью.....	29
2.2. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором	29
2.2.1. Автономные инверторы со ступенчатой формой напряжения на фазах нагрузки.....	30
2.2.2. Автономные инверторы с широтно-импульсной модуляцией.....	32
2.2.3. Автономные инверторы напряжения и тока.....	34
2.2.4. Типовые практические схемы ПЧ с АИН и АИТ.....	34
2.2.5. Выбор преобразователя частоты для АД.....	37
2.2.5.1. Выбор преобразователя частоты по энергетической совместимости при работе с одним АД.....	37
2.2.5.2. Выбор преобразователя частоты по энергетической совместимости при работе с несколькими АД.....	39
2.2.5.3. Некоторые замечания по выбору ПЧ и установке его параметров	40
2.2.5.4. Некоторые замечания по эксплуатации ПЧ	40
3. Трехфазные синхронные двигатели.....	42
3.1. Конструкция и принцип действия.....	42
3.2. Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности	43
3.3. Управление синхронным двигателем	44
3.3.1. Асинхронный пуск.....	44
3.3.2. «Частотный» пуск	45
3.3.3. Регулирование скорости	45
3.3.4. Динамическое торможение	47
3.3.5. Особенности переходных процессов электропривода с синхронным двигателем	47
3.4. Техничко-экономические показатели СД	48
3.5. Вентильные электродвигатели	48
3.6. Вентильно-индукторный привод	51
3.7. Шаговый двигатель	52
3.7.1. Принцип работы шаговых двигателей и схемы коммутации обмоток	52
3.7.2. Конструкция шаговых двигателей	55
3.7.3. Схемы управления электроприводами с ШД	56
3.7.4. Основные характеристики ШД.....	57
3.7.5. Достоинства и недостатки ШД	58
4. Отечественные промышленные сервоприводы типов СПС 25 и СПШ с векторным управлением.....	59
4.1. Конструкция и технические характеристики сервоприводов СПС 25	59
4.1.1. Комплектный сервопривод СПС 25 мощностью 750 Вт	60
4.1.2. Комплектный сервопривод СПС25 мощностью 330 Вт.....	63
4.2. Конструкция и технические характеристики сервопривода СПШ20.....	66
4.2.1. Интегрированный сервопривод СПШ20-34100	66
4.3. Системы подчиненного управления сервоприводами СПС25 и СПШ20.....	68
4.4. Программное обеспечение <i>МотоМастер</i> ®.....	69
4.4.1. Графический интерфейс <i>МотоМастер</i> ®	70
4.4.1.1. Контрольная панель.....	70
4.4.1.2. Просмотр и изменение параметров привода	71
4.4.1.3. Работа с осциллографом.....	72
4.4.1.3.1. Выбор каналов осциллографа	72
4.4.1.3.2. Управление осциллографом	73
4.4.1.3.3. Настройки внешнего вида осциллографа и отображения графиков.....	73

4.4.1.4. Программирование логического контроллера	74
4.4.1.5. Экспорт/импорт параметров	76
4.4.1.6. Обновление управляющей программы	76
4.5. Параметры сервоприводов СПС25 и СПШ	77
4.5.1. Статические параметры	78
4.5.2. Параметры управления	80
4.5.3. Динамические параметры	80
4.5.4. Системные параметры	81
4.5.5. Параметры тестирования	81
4.5.6. Пользовательские параметры	82
5. Разработка программ на языке SML	83
5.1. Обозначения, форматы данных и функции [37]	83
5.1.1. Обозначения	83
5.1.2. Форматы данных и их преобразование	84
5.1.3. Функции извлечения квадратного корня, тригонометрические и работы со стеком	85
5.2. Команды	86
5.2.1. Команды перехода и останова	86
5.2.2. Условные и циклические операции, циклы ожидания	86
5.2.3. Управление портами ввода-вывода	87
5.2.4. Управление движением	87
5.2.4.1. Варианты управления позицией, скоростью и ускорением	88
5.2.4.2. Инициализация текущей позиции привода	90
5.2.4.3. Усредненное значение момента	90
5.2.4.4. Поиск Z-метки	91
5.2.4.5. Установка ограничений позиции	91
5.2.5. События	92
5.2.6. Статус сервопривода	94
6. Методические указания к выполнению лабораторных работ	96
6.1. Лабораторная работа № 1. Разработка программ управления сервоприводами на языке SML в среде <i>МотоМастер</i> ©	97
6.2. Лабораторная работа № 2. Настройка контура скорости промышленного сервопривода. Определение численных значений показателей качества управления	102
6.3 Лабораторная работа № 3. Настройка контура положения промышленного сервопривода. Асинхронная обработка событий	112
Библиографический список	119
Приложение	121

Введение

Автоматизированным электроприводом (АЭП) называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением [35].

АЭП является базовой частью систем автоматизации технологического оборудования, технологических процессов и производств. Он в значительной мере определяет производительность, точность, надежность оборудования, экономическую эффективность всего автоматизируемого процесса [2; 6; 12].

АЭП на базе двигателей постоянного тока (ДПТ) достаточно просты и имеют достаточно жесткие механические характеристики, но их слабым местом является сам электродвигатель [8; 15]. Он дорог и ненадежен из-за наличия коллекторно-щеточного узла. При работе, особенно в режимах пуска, торможения и реверса, происходит искрение щеток, под воздействием электроэрозии изнашивается коллектор. Такой электродвигатель не может использоваться в запыленной и взрывоопасной среде. Поэтому массовый выпуск регулируемых электроприводов постоянного тока в большинстве развитых стран мира прекращен с начала XXI века [15].

Асинхронные электродвигатели (АД) превосходят двигатели постоянного тока по многим параметрам: они просты по устройству и надежны, т.к. не имеют подвижных контактов (АД с короткозамкнутым ротором); они имеют меньшие по сравнению с двигателями постоянного тока размеры, массу и стоимость при той же мощности; просты в изготовлении и эксплуатации; технология их производства практически полностью автоматизирована [15].

Однако до недавнего времени АД применялись в нерегулируемых электроприводах для вращения механизмов вентиляторов, насосов, компрессоров, открытия (закрытия) заслонок и т.д. [35]. Такой подход объясняется сложностью регулирования скорости их вращения традиционными методами (изменением питающего напряжения на обмотке статора, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток).

Аналогично синхронные двигатели (СД) из-за сложности регулирования их скорости вращения до недавнего времени также использовались в нерегулируемых электроприводах, обеспечивающих постоянную скорость вращения механизмов [35].

Развитие частотно-регулируемого электропривода переменного тока на базе АД и СД сдерживалось отсутствием надежных преобразователей частоты, хотя теория частотного регулирования была разработана еще в тридцатых годах XX века [15]. Появление силовых схем на базе новых поколений тиристоров и транзисторов (например, IGBT-транзисторов), разработка высокопроизводительных микропроцессорных систем управления позволили создать надежные электронные преобразователи частоты доступной стоимости [6; 14]. В результате в настоящее время широкое применение в различных системах автоматизации получают электроприводы переменного тока с частотным (векторным) управлением. Происходит смещение акцентов в приводных системах от двигателей постоянного тока к двигателям переменного тока.

В последнее время в построении приводов нового поколения наблюдается тенденция передачи все большего количества функций от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным, информационным), из которых состоит система управления приводом. Интеллектуальные узлы легко перепрограммируются под новое задание, что расширяет функциональные возможности привода. Вместе с тем с развитием техники узлы сервопривода разной физической природы (механические, электрические, электромеханические, электронные, информационные) постепенно объединялись в единое конструктивное целое. Именно такие интеллектуальные машины и узлы называют мехатронными [42].

Мехатроника (Mechatronics) – отрасль науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин с компьютерным (цифровым) управлением движения, которая базируется на знаниях в сферах электромеханики, электроники, микропроцессорной техники, автоматики и IT-технологий [42].

Для реализации точных движений мехатронный модуль комплектуется цифровым датчиком положения (энкодером). Электропривод, оборудованный таким датчиком, называют сервоприводом, где под сервоприводом понимается *электрический* привод с главной отрицательной обратной связью по положению, обеспечивающий точное регулирование параметров движения [44].

В состав систем управления движением, объединяющих несколько сервоприводов, входят контроллеры управления движением (сервоконтроллеры). К основным функциям сервоконтроллеров относятся координация движений отдельных сервоприводов (мехатронных модулей) и формирование для них заданий на перемещение с целью реализации сложных пространственных траекторий движения.

Дальнейшая миниатюризация средств силовой и управляющей электроники дала возможность конструктивно объединить с электромеханическими узлами еще и электронные. Появились *интеллектуальные мехатронные модули* (ИММ) в виде двигателей и мотор-редукторов с силовыми преобразователями (преобразователями частоты) на борту. Подобные устройства, благодаря наличию в их составе вычислительных устройств, способны автономно выполнять перемещения рабочих органов машин без постоянного контроля со стороны системы автоматизации верхнего уровня.

Для нужд машиностроения (в первую очередь для станков с числовым программным управлением и промышленных роботов) разработаны мехатронные модули, объединяющие в себе не только электромеханические узлы, но и сам рабочий орган машины:

- электрошпиндель (электродвигатель + шпиндельный узел для закрепления режущего инструмента);
- поворотный стол для закрепления обрабатываемой детали;
- мотор-колесо (объединение двигателя и колеса транспортного средства) и т.п.

Большое количество механизмов имеет поступательное движение рабочего органа (механизмы подачи станков, некоторые промышленные роботы и т.п.). Для них разработаны модули поступательного движения [10; 25; 31].

Цифровые системы управления мехатронными системами в зависимости от степени сложности и традиций соответствующей отрасли могут быть реализованы в виде:

- микроконтроллеров;
- сервоконтроллеров;
- программируемых логических контроллеров (ПЛК);
- систем ЧПУ (для роботов и станков);
- промышленных компьютеров и т.п.

Термины «мехатроника» и «электропривод» являются фактически синонимами. Мехатронные системы, как и системы электропривода, относятся к электромеханическим системам.

Однако к отличиям мехатронных систем следует отнести:

- относительно малую мощность (поскольку объединение в одном конструктивном модуле механических, электрических и электронных подсистем при большой их мощности реализовать невозможно);
- исключительно цифровую природу систем управления (в электроприводе возможен и аналоговый принцип построения);
- преимущественно большую точность и быстродействие.

Широкое применение мехатронных узлов в различных отраслях промышленности, освоение их производства на российских предприятиях [14] делает исключительно важной задачу получения студентами направления «Автоматизация технологических процессов и производств» (и других технических направлений, связанных с автоматизацией различных объектов и установок) навыков работы с современными сервоприводами с частотным управлением и интеллектуальными мехатронными модулями.

Для получения желаемого качества обучения необходимо понимание механизмов и принципов работы сервоприводов переменного тока с частотным управлением.

Изложение материала в пособии построено в следующей последовательности. Для наиболее широко используемых в сервоприводах с частотным управлением двигателей (трехфазных асинхронных с короткозамкнутым ротором, трехфазных синхронных, вентильных, вентильно-индукторных, шаговых) рассматриваются принципы их работы и конструкция, характеристики, способы регулирования скорости. Отдельный раздел посвящен принципам скалярного и векторного управления двигателями переменного тока. Большое внимание уделено технической реализации силовых (частотных) преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором, рассмотрению практических схем автономных инверторов напряжения и тока, приведены методика и примеры выбора преобразователя частоты по энергетической совместимости с двигателем.

Значительное место в пособии занимает подробное рассмотрение характеристик отечественных сервоприводов типов СПС 25 и СПШ с векторным управлением, систем управления ими, включая графический интерфейс *МотоМастер*©, программирование на языке *SML* ПЛК, встроенного в систему управления.

Для закрепления теоретического материала и получения студентами практических навыков работы с современными сервоприводами (интеллектуальными мехатронными модулями) в лаборатории автоматизации созданы 3 стенда на базе отечественных сервоприводов СПС 25 и СПШ.

В заключительной части пособия приводятся методические указания к выполнению лабораторных работ на указанных стендах.

1. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым (кз) ротором является в настоящее время самым распространенным видом электродвигателя в промышленности и сельском хозяйстве благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими двигателями [8; 15; 26]. Он прост и надежен в эксплуатации, т.к. не имеет коллекторно-щеточного узла, на его изготовление требуется меньше цветных металлов, он имеет меньшую массу, габариты и стоимость по сравнению с двигателями той же мощности постоянного или переменного тока, выпускается серийно в широком диапазоне мощностей.

1.1. Конструкция и принцип действия

Неподвижная часть двигателя (статор) состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Сердечник статора собирается из тонколистовой технической стали толщиной 0,35–0,5 мм, покрытой изоляционным лаком, и запрессовывается в неподвижный стальной или алюминиевый корпус. Шихтованная конструкция сердечника способствует значительному снижению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. Статор выполняется без явно выраженных полюсов, листы штампуют в виде колец, на внутренней стороне которых имеются пазы, в которые укладываются провода распределенной трехфазной обмотки. Трехфазная обмотка состоит из трех однофазных, сдвинутых в пространстве по окружности статора относительно друг друга на 120 электрических градусов [28]. Распределенная обмотка состоит из секций, расстояние между активными сторонами одной секции называется шагом обмотки y . Если шаг равен полюсному делению τ (расстоянию между серединами смежных полюсов), то шаг называется полным или диаметральной. Чаще применяют обмотки с укороченным шагом ($y < \tau$), что приближает форму кривой намагничивающей силы к синусоиде. Распределенная обмотка статора может быть и двухполюсной, и четырехполюсной, и многополюсной.

Вращающаяся часть двигателя (ротор) состоит из сердечника с короткозамкнутой обмоткой и вала (рис. 1) [22]. Сердечник ротора тоже имеет шихтованную конструкцию. Короткозамкнутая обмотка ротора имеет вид «белчьей клетки» и содержит в пазах сердечника ротора стержни обмотки, замкнутые между собой короткозамыкающими кольцами, расположенными на торцах ротора.



Рис. 1. Конструкция короткозамкнутого ротора

Статор и ротор разделены воздушным зазором, величина которого колеблется от 0,1 мм в двигателях малой мощности до 1–2,0 мм в двигателях большой.

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме «звезда» или «треугольник» в зависимости от напряжения питания сети [21]. Концы трехфазной обмотки могут быть: соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку входит шесть проводов, из коробки выходят три).

В настоящее время в эксплуатации находятся АД со старым и новым обозначениями выводов трехфазной обмотки статора (рис. 2а). Обозначения на распределительной коробке и соединение фаз обмотки статора по схеме «звезда» приведены на рис. 2б, а по схеме «треугольник» – на рис. 2в.

Фазное напряжение – разница потенциалов между началом и концом одной фазы. Другое определение: фазное напряжение – это разница потенциалов между линейным проводом и нейтралью.

Линейное напряжение – разность потенциалов между двумя линейными проводами (между фазами).

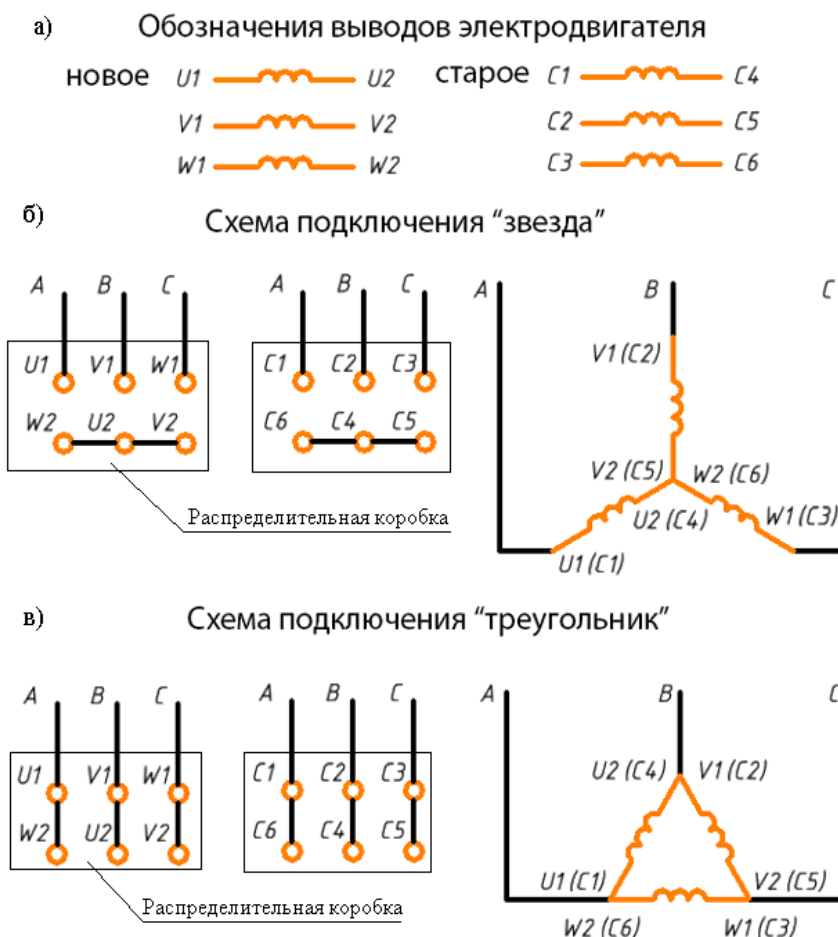


Рис. 2. Подключение обмотки статора к распределительной коробке при новом и старом обозначениях выводов

Соотношения между линейными и фазовыми напряжениями, токами и мощностями приведены в табл. 1.

Таблица 1. Напряжения, токи и мощности при соединении обмотки статора по схемам «звезда» и «треугольник»

Обозначение	«Звезда»	«Треугольник»
$U_{\text{л}}, U_{\text{ф}}$ – линейное и фазовое напряжение, В	$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$	$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$
$I_{\text{л}}, I_{\text{ф}}$ – линейный и фазовый ток, А	$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$	$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$
S – полная мощность, ВА	$S = 3S_{\text{ф}} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}$	$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}$
P – активная мощность, Вт	$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi$	$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi$

ВНИМАНИЕ! Несмотря на то, что мощности для соединений в «звезду» и «треугольник» вычисляются по одной формуле, подключение одного и того же электродвигателя разным способом в одну и ту же электрическую сеть приведет к потреблению разной мощности. При этом неправильное подключение электродвигателя может привести к расплавлению обмоток статора.

Пример: допустим, что электродвигатель был подключен по схеме «звезда» к трехфазной сети переменного тока $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ (соответственно, $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$) и потреблял ток $I_{\text{л}} = 1 \text{ А}$. Полная потребляемая мощность: $S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} = 1,73 \cdot 380 \cdot 1 = 658 \text{ Вт}$.

Теперь изменим схему соединения на «треугольник», линейное напряжение останется таким же $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, а фазовое напряжение увеличится в корень из 3 раз $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Увеличение фазового напряжения приведет к увеличению фазового тока. Таким образом, линейный ток схемы «треугольник» будет в три раза больше линейного тока схемы «звезда», а следовательно, и потребляемая мощность будет в 3 раза больше: $S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} = 1,73 \cdot 380 \cdot 3 = 1975 \text{ Вт}$.

Таким образом, если двигатель рассчитан на подключение к трехфазной сети переменного тока по схеме «звезда», подключение данного электродвигателя по схеме «треугольник» может привести к его поломке.

Если в нормальном режиме электродвигатель подключен по схеме «треугольник», то для уменьшения пусковых токов на время пуска его можно соединить по схеме «звезда». При этом вместе с пусковым током уменьшится также пусковой момент.

При протекании тока в трехфазной обмотке статора в двигателе создается вращающееся магнитное поле [18]. Скорость вращения n_1 поля называется синхронной и зависит от частоты сети f_1 и числа пар полюсов p :

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \quad (1)$$

В табл. 2 приведены возможные синхронные частоты вращения поля при промышленной частоте сети $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

Таблица 2. Синхронные частоты вращения поля статора при частоте переменного тока 50 Гц

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6
n_1 (об/мин)	3000	1500	1000	750	600	500

Поле статора при вращении пересекает стержни обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Поскольку обмотка ротора короткозамкнутая, то в ней наводится ток, который создает вокруг проводника с током свое собственное магнитное поле. В результате взаимодействия этого поля с синхронным полем статора возникают электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$ и образуемый парой сил вращающий момент $M_{\text{дв}}$. Скорость вращения ротора n_2 называется асинхронной. Она всегда меньше синхронной скорости поля n_1 , т.е. ротор всегда отстает от магнитного поля, создаваемого обмоткой статора. Действительно, если бы $n_2 = n_1$, то синхронное магнитное поле не пересекало бы проводников ротора и ток в проводниках и соответственно момент двигателя равнялись бы нулю, т.е. ротор бы не вращался.

Скорость n_s , с которой синхронное поле пересекает проводники обмотки ротора, называется скоростью скольжения

$$n_s = n_1 - n_2.$$

Отношение скорости скольжения к скорости поля называется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Скольжение может изменяться от 0 (режим хх) до 1 (пуск двигателя). Иногда скольжение измеряют в процентах $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$.

Скольжение и скорость при номинальной нагрузке называются номинальными. Номинальное скольжение АД общего применения от 1 до 8% (большее скольжение для двигателей меньшей мощности). Из выражения (2) получаем, что скорость вращения ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1(1 - s)}{p}. \quad (3)$$

При $p=1$, $f_1 = 50$ Гц и $s = 7\%$ величина $n_2 = \frac{60 \cdot 50 \cdot (1 - 0.07)}{1} = 2790 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

В номинальном режиме при $f_1 = 50$ Гц наводимая в обмотке ротора ЭДС имеет низкую частоту $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,07 = 3,5$ Гц.

Контрольные вопросы

1. Почему сердечник статора собирается из тонколистовой технической стали толщиной 0,35–0,5 мм?
2. Каким образом выполняется трехфазная обмотка статора?
3. Какова конструкция «короткозамкнутого» ротора?
4. Какие схемы используются для подключения трехфазной обмотки статора к распределительной коробке? Приведите старые и новые обозначения выводов обмотки статора.
5. Дайте определения фазного и линейного напряжений в трехфазной обмотке статора.
6. Приведите математические выражения для определения напряжений, токов и мощностей при соединении обмотки статора по схемам «звезда» и «треугольник».
7. Какая аварийная ситуация может возникнуть при подключении электродвигателя разными способами в одну и ту же электрическую сеть?
8. Поясните принцип действия 3-фазного АД с кз ротором.
9. По какой формуле определяется синхронная скорость вращения магнитного поля двигателя? Приведите возможные синхронные частоты вращения поля при промышленной частоте сети $f_1 = 50$ Гц.
10. Какая скорость называется асинхронной? По какой формуле определяется скорость скольжения?
11. По какой формуле определяется скольжение? Какова величина скольжения в номинальном режиме работы двигателя?

1.2. Электромеханические и механические характеристики

Построение электромеханической и механической характеристик АД выполнено в соответствии с математическими выражениями, полученными при анализе основной схемы включения двигателя (рис. 3а) [26]. Соответствующая ей упрощенная схема замещения с вынесенным контуром намагничивания приведена на рис. 3б, где цепи статора и ротора представлены своими активными и индуктивными сопротивлениями (R_1, X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления статора, s – скольжение).

Ток, ЭДС, активное и индуктивное сопротивления ротора приведены к цепи статора, что позволяет изобразить эти цепи соединенными электрически, хотя связь между ними осуществляется через электромагнитное поле. Приведение осуществляется с помощью коэффициента трансформации по ЭДС:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}},$$

где E_1 – ЭДС одной из фаз статора, наводимая переменным магнитным полем; E_2 – ЭДС, которая наводится в неподвижном роторе от переменного напряжения на фазе статора; w_1 и w_2 – числа витков обмоток статора и ротора соответственно; k_{w1} и k_{w2} – коэффициенты обмоток статора и ротора соответственно. Формулы приведения имеют вид: приведенная ЭДС ротора $\dot{E}_2' = k \dot{E}_2 = \dot{E}_1$ (приведенная ЭДС ротора равна ЭДС статора), приведенный ток ротора $\dot{I}_2' = k \dot{I}_2$, приведенное активное сопротивление ротора $R_2' = k^2 R_2$, приведенное индуктивное сопротивление ротора $X_2' = k^2 X_2$. Ток намагничивания I_μ , определяющий магнитный поток двигателя, протекает под действием фазного напряжения сети $\dot{U}_\phi$ по отдельной цепи.

У АД электромеханическая $\omega = f(\dot{I}_2')$ и механическая $\omega = f(M_{\text{дв}})$ характеристики не совпадают. Из рассмотрения схемы на рис. 3б получаем зависимость приведенного тока $\dot{I}_2'$ ротора от фазового напряжения $\dot{U}_\phi$.

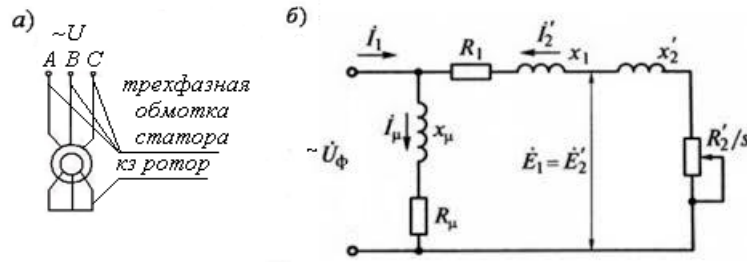


Рис. 3. Схема включения (а) и замещения (б) трехфазного АД с кз ротором

$$I_2' = \frac{\dot{U}_\Phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4)$$

В выражении (4) на ток I_2' влияет единственная переменная s . Задаем ряд значений скольжения s и рассчитываем для каждого из них величину тока I_2' . Для перехода к электромеханической характеристике $\omega = f(I_2')$ пересчитываем использованные значения скольжения s на угловую скорость вращения ω по формуле $\omega = \omega_0(1 - s)$.

На рис. 4 приведена электромеханическая характеристика $\omega = f(I_2')$ для АД с кз ротором. По вертикальной оси указаны связанные формулой $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ значения скольжения s и скорости ω .

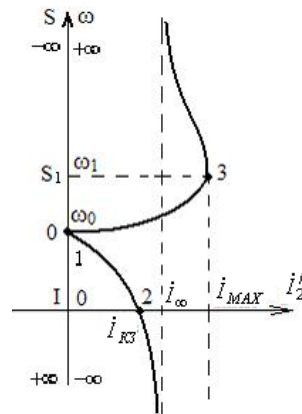


Рис. 4. Электромеханическая характеристика АД

Проанализируем характерные точки и асимптоты электромеханической характеристики:

- точка 1, режим идеального холостого хода $s = 0$, $\omega = \omega_0$, $I_2' = 0$;

- точка 2, режим короткого замыкания (пуск) $s = 1$, $\omega = 0$, $I_2' = I_{кз} = \frac{\dot{U}_\Phi}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$;

- асимптота тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости $I_2' = I_\infty = \frac{\dot{U}_\Phi}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$ при $s \rightarrow +\infty, \omega \rightarrow -\infty$ или $s \rightarrow -\infty, \omega \rightarrow +\infty$;

- точка максимального значения тока ротора (точка 3), лежащая в области отрицательных скольжений в генераторном режиме; если $s = s_1 = -\frac{R_2'}{R_1}$, то ток в роторе имеет наибольшее значение

$$I_2' = I_{\max} = \frac{\dot{U}_\Phi}{X_1 + X_2'}; \text{ скольжению } s_1 \text{ соответствует угловая скорость } \omega_1 = \omega_0(1 + s_1).$$

Определим математическое выражение для построения механической характеристики $\omega = f(M_{\text{дв}})$ двигателя (кривая 1 на рис. 5).

Потери мощности в роторе, выраженные через механические величины:

$$\Delta P_{2\text{Мех}} = M_{\text{дв}}\omega_0 - M_{\text{дв}}\omega = M_{\text{дв}}(\omega_0 - \omega) = M_{\text{дв}}\omega_0 s.$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические величины

$$\Delta P_{2\text{эл}} = 3(I_2')^2 R_2'.$$

По закону сохранения энергии $M_{\text{дв}}\omega_0 s = 3(I_2')^2 R_2'$ и

$$M_{\text{дв}} = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}. \quad (5)$$

Подставляем в выражение (5) значение I_2' , из выражения (4) получаем значение электромагнитного момента АД:

$$M_{\text{дв}} = \frac{3U_{\Phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (6)$$

В выражении (6) на электромагнитный момент влияет единственная переменная s . Задаем ряд значений скольжения s и рассчитываем для каждого из них величину момента $M_{\text{дв}}$. Для перехода к механической характеристике $\omega = f(M_{\text{дв}})$ (график 1 на рис. 5) пересчитываем использованные значения скольжения s на угловую скорость вращения ω по формуле $\omega = \omega_0(1 - s)$.

Для нахождения экстремальных точек механической характеристики найдем корни уравнения $\frac{dM_{\text{дв}}}{ds} = 0$. Имеются 2 экстремальных точки скольжения и момента:

$$s_{\text{экс}} = \frac{\pm R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}},$$

$$M_{\text{экс}} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}. \quad (7)$$

Значения момента $M_{\text{экс}} = M_{\text{кд}}$, $M_{\text{экс}} = M_{\text{кг}}$ и скольжения $s_{\text{экс}} = s_{\text{кд}}$, $s_{\text{экс}} = s_{\text{кг}}$, соответствующие экстремальным точкам, называются критическими (рис. 5). $M_{\text{кд}}$ – наибольший момент АД, определяющий его перегрузочную способность. Знак «плюс» относится к двигательному режиму $s_{\text{кд}} > 0$, а знак «минус» – к генераторному режиму $s_{\text{кг}} < 0$.

Приведенная на рис. 5 механическая характеристика 1 соответствует определенному чередованию фаз питающего напряжения, например ABC . При изменении порядка чередования любых двух фаз (например, BAC) АД имеет аналогичную механическую характеристику (кривая 2), но симметричную относительно начала координат (двигатель изменяет направление вращения).

Энергетический режим работы АД определяется значением и знаком скольжения (см. рис. 5):

- режим идеального холостого хода, $s = 0$, $\omega = \omega_0$;
- режим короткого замыкания (пусковой), $s = 1$, $\omega = 0$;
- двигательный режим, $0 < s < 1$, $0 < \omega < \omega_0$;
- генераторный режим (торможение противовключением), $s > 1$, $\omega < 0$;
- генераторный режим (рекуперативное торможение), $s < 0$, $\omega > \omega_0$.

Как правило, в справочниках на АД приводятся значения следующих параметров:

- U_{Φ} – напряжение, подведенное к обмотке статора (фазное значение), В;
- $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;
- $\eta_{\text{ном}}$ – КПД двигателя в номинальном режиме;

- $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения ротора двигателя, об/мин;
- $\cos \varphi_{\text{ном}}$ – коэффициент мощности двигателя в номинальном режиме;
- $s_{\text{ном}}$ – скольжение в номинальном режиме;
- $\lambda_m = M_{\text{кД}} / M_{\text{ном}}$ – кратность максимального момента;
- $\lambda_n = M_{\text{кЗ}} / M_{\text{ном}}$ – кратность пускового момента;
- $\lambda_I = I_{\text{кЗ}} / I_{\text{ном}}$ – кратность пускового тока.

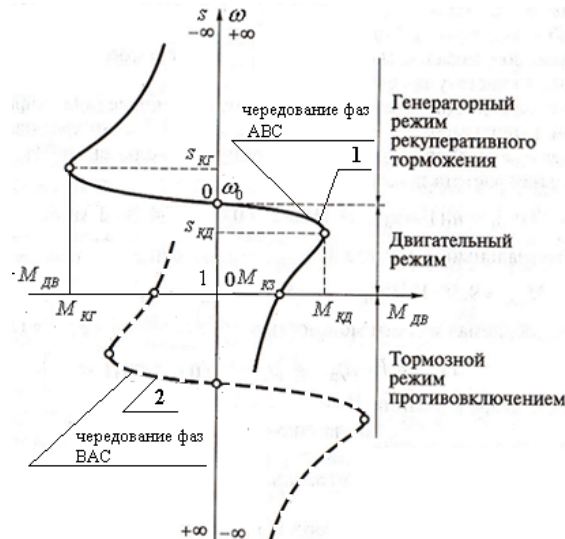


Рис. 5. Механическая характеристика $\omega = f(M_{\text{дв}})$ для трехфазного АД с кз ротором

Значения сопротивлений обмоток АД в каталогах не приводятся, что создает трудности при расчете электромагнитного момента по формуле (6). Поэтому в практических расчетах пользуются упрощенной формулой (формулой Клосса) [19]:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2M_{\text{кД}}}{(s / s_{\text{кД}}) + (s_{\text{кД}} / s)}. \quad (8)$$

Пользуясь формулой Клосса, можно построить график механической характеристики по паспортным данным асинхронного двигателя. Возможная неточность при использовании этой формулы для расчета момента в пределах рабочего участка механической характеристики ($s < s_{\text{кД}}$) не превышает значений, допустимых для практических расчетов. Для вычисления критического скольжения $s_{\text{кД}}$, соответствующего максимальному моменту $M_{\text{кД}}$, можно воспользоваться упрощенной формулой

$$s_{\text{кД}} = s_{\text{ном}} (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}). \quad (9)$$

Для трехфазных АД с кз ротором справедливы следующие зависимости:

1. Момент на валу двигателя в номинальном режиме, Нм

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}. \quad (10)$$

2. Номинальное значение тока в фазной обмотке статора, А

$$I_{\text{1ном}} = 10^3 \cdot P_{\text{ном}} / 3 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ф}} \cdot \cos \phi_{\text{ном}}. \quad (11)$$

3. Используя данные каталога, определяют:

$$\text{– максимальный момент} \quad M_{\text{кД}} = M_{\text{ном}} \lambda_m, \quad (12)$$

$$\text{– пусковой момент} \quad M_{\text{кЗ}} = M_{\text{ном}} \lambda_n, \quad (13)$$

$$\text{– пусковой ток} \quad I_{\text{кЗ}} = I_{\text{1ном}} \lambda_I. \quad (14)$$

Различают естественную и искусственные механические характеристики АД. Естественная механическая характеристика АД соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. Искусственные механические характеристики трех-

фазного АД с кз ротором получают за счет изменение питающего напряжения, питающей частоты, введения в цепь статора добавочных сопротивлений. Искусственных механических характеристик может быть бесконечно много, естественная характеристика – одна. В АЭП двигатели, как правило, работают на искусственных механических характеристиках.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте основную схему включения АД с кз ротором.
2. С какой целью разрабатывается схема замещения двигателя?
3. Дайте определения электромеханической и механической характеристик двигателя.
4. Назовите три характерные точки и асимптоту на электромеханической характеристике АД.
5. Изобразите механическую характеристику АД с кз ротором.
6. Каким образом можно изменить направление вращения вала АД?
7. В каких энергетических режимах может работать АД?
8. Дайте определение естественной и искусственных механических характеристик АД. Сколько естественных и искусственных характеристик может иметь двигатель? На каких характеристиках работает АД в автоматизированном электроприводе?
9. Какая формула используется в практических расчетах для построения механических характеристик двигателя?

1.3. Регулирование скорости АД

Механические характеристики для двигательного режима (см. рис. 5) располагаются в первом квадранте (при вращении ротора в одном направлении) или в третьем квадранте (при вращении ротора в другом направлении).

Существуют три способа регулирования скорости вращения ротора: изменением величины напряжения на обмотке статора, изменением числа полюсов и изменением частоты питающего напряжения.

1.3.1. Регулирование скорости АД изменением величины напряжения на обмотке статора

При этом способе регулирования скорости между сетью и статором двигателя включается преобразователь напряжения (рис. 6) [15; 26]. Для регулирования напряжения на обмотке статора в настоящее время наиболее распространены тиристорные преобразователи напряжения (ТПН), которые серийно выпускаются промышленностью. Их достоинства: высокий КПД, легкость автоматизации электропривода, простота в обслуживании. Выходное напряжение U_{1per} изменяется вниз от номинального значения сетевого напряжения $\sim U_{сети}$ практически до 0 (за счет изменения угла включения тиристоров) под действием маломощного сигнала $U_{упр}$ от схемы импульсно-фазового управления (СИФУ). Частота напряжения f на обмотке статора не изменяется и равна 50 Гц.

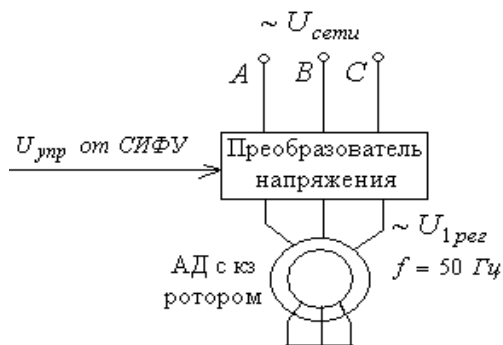


Рис. 6. Схема регулирования напряжения на обмотке статора

Существенный недостаток этого способа регулирования скорости вращения ротора – большие потери в обмотке ротора $\Delta P_2 = M_{дв} \omega_0 s$ при малых скоростях (больших скольжениях s).

Показатели регулирования скорости при управлении напряжением статора:

- диапазон регулирования скорости $D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$ при использовании обратной связи – до 10;
- регулирование скорости только вниз от естественной характеристики;
- при использовании ОС жесткость характеристик высокая;
- экономичность зависит от времени работы на пониженной скорости по отношению к общему циклу работы АД.

Из-за узкого диапазона регулирования скорости и больших потерь в обмотке ротора при малых скоростях вращения вала двигателя этот способ регулирования имеет ограниченное применение в современных электроприводах переменного тока.

1.3.2. Регулирование скорости АД изменением числа пар полюсов

Поскольку скорость холостого $\omega_0 = 2\pi f / p$, изменяя число пар полюсов $p = 1, 2, 3, \dots$, можно ступенчато регулировать скорость вращения ротора [26].

При регулировании скорости АД изменением числа пар полюсов используются многоскоростные АД с кз ротором. У многоскоростных двигателей обмотка каждой фазы разделена на две секции (или больше) каждая со своими выводами. На рис. 7 показаны начала первой и второй секции фазы A ($A_{1н}$, $A_{2н}$ соответственно) и их концы $A_{1к}$, $A_{2к}$. Обозначения для выводов секций фаз B и C на рис. 7 опущены. Различное число полюсов получается за счет различных схем соединения секций каждой фазы [26].

Наиболее часто на практике встречаются 2 схемы переключения статорной обмотки многоскоростных АД [26]:

- с треугольника на двойную звезду;
- со звезды на двойную звезду.

При переключении с треугольника (рис. 7а) на двойную звезду (рис. 7б) число пар полюсов уменьшается в 2 раза ($p_1 = 2p_2$). Допустимая мощность для схемы треугольника (рис. 7а)

$$P_{1\text{доптр}} = 3U_1 I_{1\text{ном}} \cos \phi_{1\text{тр}},$$

а для схемы двойная звезда (рис. 7б)

$$P_{1\text{доп2зв}} = \frac{3U_1}{\sqrt{3}} 2I_{1\text{ном}} \cos \phi_{1зв} = 3.46U_1 I_{1\text{ном}} \cos \phi_{1зв}.$$

Из полученных выражений следует, что при $\cos \phi_{1\text{тр}} \approx \cos \phi_{1зв}$ допустимая мощность АД остается практически неизменной $P_{1\text{доптр}} \approx P_{1\text{доп2зв}}$. Поскольку $P = M_{\text{дв}} \omega$, то при уменьшении вдвое числа полюсов p_2 и соответственно увеличении вдвое скорости ω_{02} допустимый момент $M_{2\text{доп}}$ уменьшается вдвое по сравнению с $M_{1\text{доп}}$ (рис. 7в).

Такой способ регулирования скорости целесообразно применять при нагрузке электропривода, имеющей характер постоянной мощности $P = M\omega = \text{const}$.

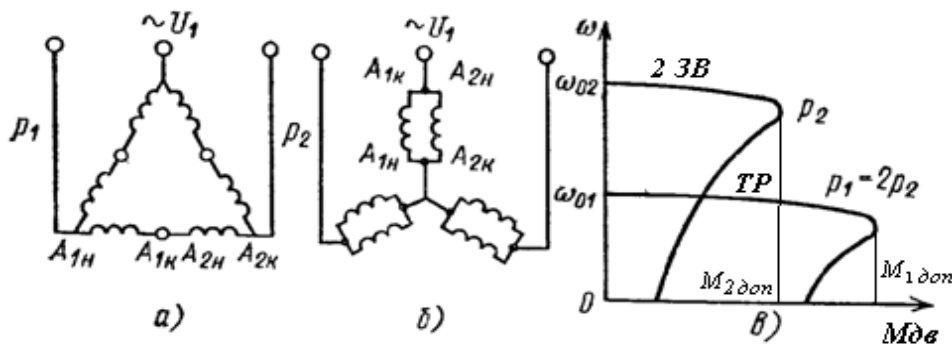


Рис. 7. Соединение обмоток статора в треугольник (а), двойную звезду (б) и механические характеристики при схемах «треугольник» (ТР) и «двойная звезда» (2ЗВ)

При переключении со звезды (рис. 8а) на двойную звезду (рис. 7б) число полюсов уменьшается вдвое, скорость ω_{02} увеличивается в два раза, а максимальный момент двигателя $M_{\text{кд}}$ остается постоянным (рис. 8б). Это следует из анализа выражений для допустимой мощности. Для схемы «звезда» $P_{\text{1допзв}} = \frac{3U_1}{\sqrt{3}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{1зв}}$, для схемы «двойная звезда» $P_{\text{1доп2зв}} = \frac{3U_1}{\sqrt{3}} 2I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{1зв}}$. Следовательно, $P_{\text{1доп2зв}} = 2P_{\text{1допзв}}$.

Такой способ регулирования скорости целесообразно применять при нагрузке электропривода, имеющей характер постоянного момента сопротивления $M_{\text{с}} = \text{const}$.

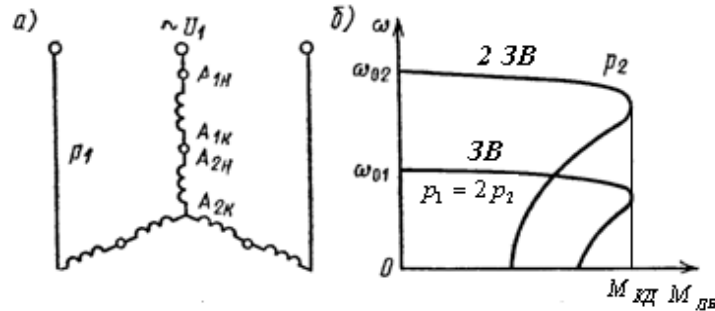


Рис. 8. Соединение обмоток статора в звезду (а) и механические характеристики двигателя для схем «звезда» (3В), «двойная звезда» (2 3В) (б)

Применяются также трех- и четырехскоростные АД, которые позволяют получить три или четыре механические характеристики.

Данный способ регулирования достаточно широко применяется в электроприводах, где требуется ступенчатое регулирование скорости, т.к. экономичен. Изменение скорости не сопровождается увеличением скольжения, и потери в роторе $\Delta P_2 = M_{\text{дв}} \omega_0 s$ невелики. Диапазон регулирования скорости зависит от числа возможных пар полюсов, равен 8 для четырехскоростных двигателей.

1.3.3. Регулирование скорости АД изменением частоты напряжения на обмотке статора

Наиболее перспективным и широко используемым способом регулирования скорости АД является частотный [15; 26; 36]. Принцип его заключается в том, что, изменяя частоту питающего напряжения f_1 , можно изменять синхронную скорость вращения $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$, получая различные искусственные характеристики. Важное свойство – при регулировании скорости не происходит увеличения скольжения и потери скольжения $\Delta P_2 = M_{\text{дв}} \omega_0 s$ невелики.

Для лучшего использования АД и сохранения перегрузочной способности (величины максимального момента ($M_{\text{кд}} = \text{const}$) двигателя) одновременно с изменением частоты $f_{\text{1рег}}$ необходимо изменять и величину питающего напряжения $\sim U_{\text{1рег}}$ (рис. 9).

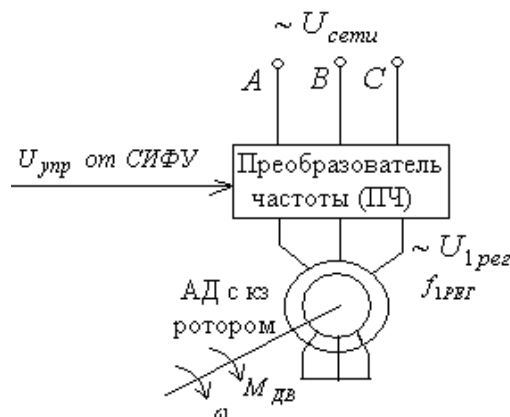


Рис. 9. Схема включения преобразователя частоты

При выборе соотношения между частотой и напряжением исходят из условия сохранения перегрузочной способности АД $\lambda_m = M_{кД}/M_C = \text{const}$.

Если в формуле (7) пренебречь активным сопротивлением статора R_1 и учесть что $\omega_0 \sim f_1$ и $X_1 + X_2' \sim f_1$, то выражение для максимального момента двигателя можно записать в виде

$$M_{кД} = M_{экс} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \cdot (X_1 + X_2')} = A \cdot \frac{U_{\Phi}^2}{f_1^2},$$

где A – постоянная, не зависящая от f_1 .

Тогда

$$\lambda_m = \frac{M_{кД}}{M_C} = A \cdot \frac{U_{\Phi}^2}{f_1^2 \cdot M_C} = \text{const}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что для любых двух значений частоты f_{1i} и f_{1k} должно соблюдаться следующее соотношение:

$$U_{\Phi i}^2 / (f_{1i}^2 \cdot M_{Ci}) = U_{\Phi k}^2 / (f_{1k}^2 \cdot M_{Ck}).$$

Отсюда следует основной закон изменения напряжения при частотном способе регулирования скорости АД:

$$\frac{U_{\Phi i}}{U_{\Phi k}} = \frac{f_{1i}}{f_{1k}} \sqrt{\frac{M_{Ci}}{M_{Ck}}}. \quad (16)$$

Из выражения (16) получим частные законы изменения напряжения и частоты при различных зависимостях M_C от скорости.

1. Момент сопротивления не зависит от скорости АД $M_C = \text{const}$ ($M_{Ci} = M_{Ck}$). Тогда

$$\frac{U_{\Phi i}}{f_{1i}} = \text{const}. \quad (17)$$

Напряжение на статоре и его частота должны изменяться пропорционально.

2. Для вентиляторного момента сопротивления

$$\frac{U_{\Phi i}}{f_{1i}^2} = \text{const}. \quad (18)$$

3. При моменте M_C , обратно пропорциональном скорости

$$\frac{U_{\Phi i}}{\sqrt{f_{1i}}} = \text{const}. \quad (19)$$

Следовательно, чтобы наиболее эффективно реализовать принципы частотного управления АД, необходимо в зависимости от вида нагрузки на валу двигателя управлять напряжением на обмотке статора взаимосвязанно с изменением частоты тока в ней.

Рассмотрим механические характеристики для частного закона (17), когда $M_C = \text{const}$ (рис. 10). Для частот ниже номинальной $f_{11} < f_{1ном}$ максимальный (критический) момент $M_{кД0}$ постоянен, что обеспечивает неизменную перегрузочную способность привода. Однако законы управления (17) – (19) справедливы только в случае, когда активным сопротивлением статора R_1 можно пренебречь. В реальном приводе при малых значениях частоты ($f_1 \leq 0,5 \cdot f_{1ном}$) падение напряжения на сопротивлении R_1 существенно снижает величину напряжения на обмотке ротора, что уменьшает магнитный поток и максимальный (критический) момент двигателя. Например, при рассматриваемом законе управления наблюдается снижение максимального момента двигателя при $f_{12} \ll f_{1ном}$ и перегрузочная способность АД уменьшается ($M_{кД2} < M_{кД0}$). Для поддержания постоянной перегрузочной способности АД во всем рабочем диапазоне при $f_1 \leq f_{1ном}$ необходимо при малых частотах уменьшать напряжение в меньшей степени, чем снижается частота [26; 36]. На практике используют управление

с IR -компенсацией [8], что является стандартной функцией в современных серийных преобразователях частоты для АД.

Для частот выше номинальной $f_{15} > f_{14} > f_{1ном}$ (рис. 10) напряжения $U_{15} = U_{14} = U_{1ном}$, т.к. по техническим условиям (ТУ) напряжение питания не может быть выше номинального. Условие (17) не соблюдается, и перегрузочная способность двигателя снижается ($M_{кД5} < M_{кД4} < M_{кД0}$). Верхний предел частоты вращения асинхронного двигателя зависит от механических свойств привода. Например, существенно возрастает износ подшипников, срок службы которых рассчитывается для номинальной скорости вращения ротора. Поэтому при увеличении числа оборотов ротора двигателя выше номинального значения частота источника питания не должна превышать номинальную более чем в 1,5–2 раза.

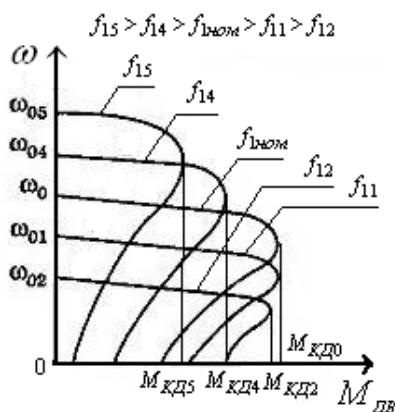


Рис. 10. Механические характеристики АД в двигательном режиме при частотном управлении

Контрольные вопросы

1. Назовите способы регулирования скорости АД с кз ротором.
2. Приведите схему регулирования скорости АД изменением амплитуды напряжения на обмотке статора. Какой фактор является главным недостатком этой схемы регулирования скорости? Каков диапазон регулирования скорости для этой схемы?
3. Каким образом устроены обмотки статора многоскоростного АД с кз ротором?
4. Изобразите механические характеристики АД при переключении обмотки статора со схемы «треугольник» на схему «двойная звезда». При какой нагрузке электропривода целесообразно применять этот способ регулирования скорости?
5. Изобразите механические характеристики АД при переключении обмотки статора со схемы «звезда» на схему «двойная звезда». При какой нагрузке электропривода целесообразно применять этот способ регулирования скорости?
6. Зависит ли мощность потерь в роторе от его скорости вращения при регулировании скорости изменением числа пар полюсов?
7. В чем заключается принцип частотного регулирования скорости вращения ротора двигателя?
8. С какой целью одновременно с изменением частоты изменяют амплитуду напряжения питания обмотки статора?
9. Изобразите схему включения преобразователя частоты.
10. Приведите формулу для основного закона изменения напряжения при частотном способе регулирования скорости АД, частные законы изменения напряжения и частоты при различных зависимостях момента сопротивления M_c от скорости (при постоянном M_c , при вентиляторном M_c , при M_c , обратно пропорциональном скорости).
11. Изобразите механические характеристики АД при частотном управлении и постоянном M_c . Как изменяется перегрузочная способность двигателя при частотах напряжения, меньших или равных номинальной, больших номинальной?

1.4. Торможение и реверс АД

В промышленных АЭП находят применение три способа торможения трехфазных АД с кз ротором: противовключением, рекуперативное и динамическое. Первые два способа осуществляются в основной схеме включения двигателя.

1.4.1. Торможение противовключением и реверс

Перевод АД с кз ротором в режим торможения противовключением выполняется изменением порядка чередования фаз питающего напряжения, например, порядок чередования фаз ABC заменяется на ACB (рис. 11а) [26]. Пусть АД работает в двигательном режиме при чередовании фаз ABC , момент сопротивления M_c и угловой скорости $\omega_{уст}$, т.е. в рабочей точке A характеристики 1 на рис. 11б. При переключении двух фаз (например, B и C) характеристике 1 соответствует характеристика 2, симметричная ей относительно начала координат.

Непосредственно торможению АД противовключением соответствует участок BC кривой 2. Скорость ω уменьшается от $\omega_{уст}$ до 0, т.к. момент $M_{дв}$ изменяет знак и становится тормозящим. Если в точке C двигатель не остановить, то он начинает вращаться в противоположном направлении (осуществляется реверс) и разгоняется до скорости $-\omega_{уст}$ (точка D на рис. 11б).

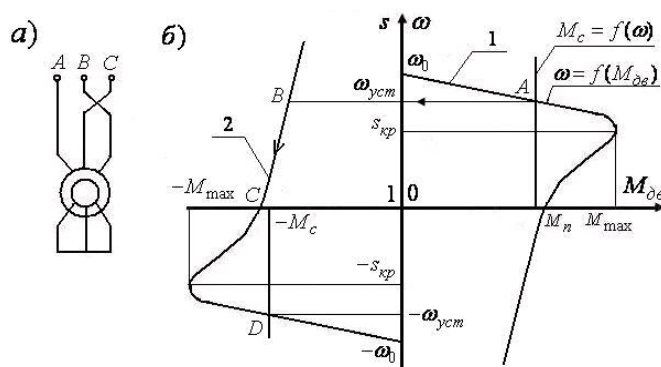


Рис. 11. Торможение противовключением и реверс АД:
а – схема включения; б – механические характеристики

Недостатком трехфазных АД с кз ротором являются значительные пусковые токи, многократно превышающие номинальные ($\lambda_I = 5 \div 7$) [15]. Это неблагоприятно влияет как на питающую сеть, вызывая в ней значительные колебания напряжения, так и на сам двигатель. Для двигателей малой и средней мощности, допускающих непосредственное подключение к сети, используются релейно-контакторные схемы управления, обеспечивающие пуск, реверс и торможение АД [26]. Эти схемы строятся в функции времени переходного процесса или текущей скорости тока в обмотке двигателя.

В современных электроприводах улучшение пусковых свойств достигается двумя путями: применением частотного управления или использованием защитно-пусковых устройств (ЗПУ), называемых «софт-стартерами», например, устройств плавного пуска серий ДМС и УПР1 [18].

Оба эти способа позволяют:

- плавно запустить и остановить двигатель, исключая механические удары как на рабочий механизм, так и на двигатель;
- снизить пусковые токи в двигателе и устранить резкие броски тока в питающей сети, что могло бы вызвать значительное падение напряжения в этой сети, нарушив работу других потребителей;
- получить энергосберегающий эффект как в процессе пуска, так и в процессе работы двигателя в установившемся режиме; например, в часы работы двигателя с недогрузкой возможно снижение напряжения питания двигателя, что поддержит коэффициент мощности двигателя на достаточном уровне и снизит потери.

1.4.2. Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения АД, поскольку осуществляется с отдачей энергии в сеть. Этот вид торможения осуществляется, когда скорость ротора превышает синхронную скорость поля. В электроприводах на базе АД с кз ротором возможны 3 варианта возникновения рекуперативного торможения [26].

Вариант I реализуется в системе «преобразователь частоты – двигатель» (ПЧ – АД) при остановке двигателя или его переходе с одной искусственной характеристики на другую при уменьшении скорости (рис. 12). Пусть в исходном состоянии текущая угловая скорость вращения ротора равняется $\omega_{уст1}$ и рабочая точка *A* располагается на характеристике 1, соответствующей частоте $f_{пер1}$ и синхронной скорости магнитного поля $\omega_{01} = 2\pi f_{пер1} / p$, создаваемого обмоткой статора. При уменьшении частоты $f_{пер2} < f_{пер1}$, которой соответствует синхронная скорость магнитного поля ω_{02} , осуществляется переход на характеристику 2. Поскольку скорость ω мгновенно измениться не может, то при переключении в режим торможения осуществляется переход в точку *B* характеристики 2, где $\omega_{уст1} > \omega_{02}$. При этом электромагнитный момент двигателя становится отрицательным ($-M_r$), т.е. тормозящим. В силу инерции текущая скорость ω будет изменяться медленнее, чем синхронная, и будет постоянно превышать скорость магнитного поля ω_{02} . При уменьшении скорости от $\omega_{уст1}$ до ω_{02} двигатель работает в режиме рекуперативного торможения, используя кинетическую энергию нагрузки (генераторный режим). Схема ПЧ проектируется со специальной цепью для передачи энергии от двигателя в сеть.

Установившемуся режиму соответствует рабочая точка *C* с координатами $M_c, \omega_{уст2}$.

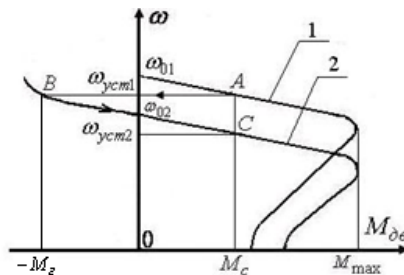


Рис. 12. Механические характеристики АД при рекуперативном торможении

Режим рекуперативного торможения часто используется для «подтормаживания», т.е. для уменьшения скорости перед полной остановкой механизма. Такой подход позволяет избежать механических ударов и толчков при резком торможении.

Вариант II возникает в приводе с многоскоростным АД при переходе с высокой скорости на низкую. Пусть в исходном положении АД работал на характеристике 1 в точке *A* со скоростью вращения ротора $\omega_{уст1}$ (см. рис. 12). При увеличении числа пар полюсов p двигатель переходит на характеристику 2, участок *BC* которой соответствует торможению с рекуперацией энергии в сеть.

Вариант III. Рекуперативное торможение возможно также в подъемном устройстве с активным статическим моментом. Под действием массы опускаемого груза частота вращения ротора может достичь значения, превышающего синхронную частоту вращения поля. В этом случае АД переходит в генераторный тормозной режим, вращаясь в направлении спуска груза. Вырабатываемая при этом электроэнергия поступает в сеть.

1.4.3. Динамическое торможение

Этот режим применяется в случае, когда после отключения двигателя от сети требуется его быстрая остановка без реверса. При динамическом торможении трехфазного АД с кз ротором обмотка статора отключается от сети трехфазного переменного напряжения U_c и подключается к источнику постоянного напряжения U_n (рис. 13а) [20; 26]. Постоянное напряжение подключается к двум последовательно включенным фазам статора. Регулируемый с помощью резистора $R_{дт}$ постоянный ток I_n , протекая по обмотке статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле, которое

наводит ЭДС и ток I_2 в обмотке вращающегося ротора. Этот ток создает свое неподвижное относительно статора поле. Складываясь, поля статора и ротора образуют результирующее магнитное поле. Взаимодействие тока I_2 вращающегося ротора с результирующим магнитным полем двигателя создает тормозной момент. Двигатель работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая кинетическую энергию движущихся частей привода в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в цепи ротора [15].

Если точка A соответствует установившемуся режиму работы при моменте двигателя $M_{дв} = M_c$, при скорости $\omega = \omega_{уст}$ и скольжении $s = s_{уст}$ (рис. 13б), то при переходе к режиму динамического торможения при токе $I_{н1}$ рабочая точка из A перемещается в B и в процессе торможения скорость уменьшается по механической кривой динамического торможения от начальной $\omega_{уст}$ до конечной $\omega = 0$ под действием тормозного момента двигателя $M_{дт}$ и момента сопротивления M_c . Механическая характеристика двигателя в режиме динамического торможения располагается во втором квадранте, и величина критического (максимального) момента динамического торможения $M_{кдт1}$ определяется величиной тока $I_{н1}$ [26]. При токе $I_{н2} > I_{н1}$ максимальный тормозной момент $M_{кдт2}$ увеличивается.

Расчет режима динамического торможения заключается в определении величины постоянного тока I_n , обеспечивающей заданное время динамического торможения $t_{дт}$.

Методика такого расчета приведена в литературе [23].

ВНИМАНИЕ! В реальной схеме (рис. 13а) величина постоянного тока I_n ограничивается только активным сопротивлением двух фаз обмотки статора и сопротивлением настроечного резистора $R_{дт}$ и не должна превышать номинального значения переменного тока в обмотке статора $I_{ном}$. Однако, поскольку у трехфазных АД с кз ротором начальные тормозные моменты малы, для их увеличения (обеспечения заданного времени торможения) в обмотку статора подают постоянный ток, равный 4–5-кратному значению тока холостого хода $I_n \leq (4 \div 5)I_0$.

Если полученное значение I_n превышает $I_{ном}$, то необходимо осуществить проверку двигателя на нагрев. Нагрев двигателя не будет превышать допустимой температуры при выполнении условия

$$M_{экв} \leq M_{ном}, \quad (20)$$

где $M_{экв}$ – эквивалентный момент двигателя, определяемый за цикл работы и учитывающий долю времени динамического торможения в общем цикле работы двигателя [25]; $M_{ном}$ – номинальный момент двигателя. Если требуемая величина I_n не удовлетворяет условию (20), то следует рассмотреть возможность торможения противовключением или выбрать другой двигатель данной серии ближайшей большей мощности.

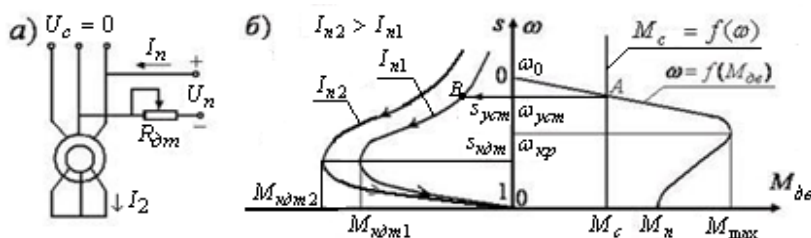


Рис. 13. Режим динамического торможения трехфазного АД с кз ротором:
а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

Контрольные вопросы

1. Назовите три способа торможения трехфазного АД с кз ротором.
2. Изобразите схему включения и механические характеристики двигателя при торможении противовключением.
3. Какова величина пусковых токов в трехфазных АД с кз ротором? Пути улучшения пусковых свойств АД в современных электроприводах.
4. Изобразите механические характеристики двигателя при рекуперативном торможении. Почему этот режим является наиболее экономичным?

5. Назовите три варианта возникновения рекуперативного торможения в электроприводах на базе трехфазных АД с кз.
6. Изобразите схему включения и механические характеристики двигателя при динамическом торможении.
7. В чем заключается расчет режима динамического торможения АД?
8. Когда требуется проверка двигателя на нагрев при динамическом торможении?

1.5. Скалярное и векторное управление двигателями переменного тока

В современных АЭП переменного тока широко используют скалярное и векторное управление.

1.5.1. Скалярное управление

Скалярное управление (частотное) – метод управления электродвигателем переменного тока, который заключается в том, чтобы поддерживать постоянным отношение напряжение/частота (В/Гц) во всем рабочем диапазоне скоростей, при этом контролируется только величина и частота питающего напряжения (рис. 14) [29].

Отношение В/Гц вычисляется на основе номинальных значений напряжения и частоты контролируемого электродвигателя переменного тока. Поддерживая постоянным значение отношения В/Гц, мы можем поддерживать относительно постоянным магнитный поток в зазоре двигателя. Если отношение В/Гц увеличивается, тогда электродвигатель становится перевозбужденным, и наоборот, если отношение уменьшается, двигатель находится в недовозбужденном состоянии.

На низких оборотах необходимо компенсировать падение напряжения на сопротивлении статора, поэтому отношение В/Гц на низких оборотах устанавливают выше номинального значения.

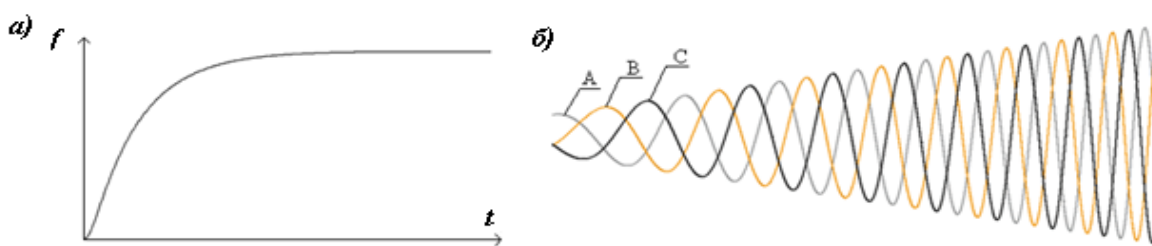


Рис. 14. Изменение частоты и амплитуды напряжения на обмотке статора:
 а – зависимость частоты питания двигателя от времени при скалярном управлении;
 б – изменение напряжения питания электродвигателя при скалярном управлении

При скалярном методе управления скорость АД контролируется установкой амплитуды и частоты напряжения питания обмоток статора таким образом, чтобы магнитное поле в зазоре поддерживалось на нужной величине. Для поддержания постоянного магнитного поля в зазоре отношение В/Гц должно быть постоянным на разных скоростях.

При увеличении скорости напряжение питания статора также должно пропорционально увеличиваться. Однако синхронная частота асинхронного двигателя не равна частоте вращения вала, а скольжение АД зависит от нагрузки. Таким образом, система со скалярным управлением без обратной связи не может точно контролировать скорость при наличии нагрузки. Для решения этой задачи в систему добавляется обратная связь по скорости, а следовательно, и компенсация скольжения [38].

Скалярное управление АД – хорошая альтернатива для приложений, где нет переменной нагрузки и не требуется хорошая динамика (вентиляторы, насосы). Для работы скалярного управления не требуется датчик положения ротора, а скорость ротора может быть оценена по частоте питающего напряжения.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает несколькими существенными недостатками:

- во-первых, если не установлен датчик скорости, нельзя управлять скоростью вращения вала АД, т.к. она зависит от нагрузки (наличие датчика скорости решает эту проблему);
- во-вторых, нельзя управлять моментом (конечно, эту задачу можно решить с помощью датчика момента, но стоимость его установки очень высока, и будет скорее всего выше самого электропривода, а управление моментом будет очень инерционным);
- нельзя управлять одновременно моментом и скоростью.

Скалярное управление достаточно для большинства задач, в которых применяется замкнутый электропривод с диапазоном регулирования частоты вращения двигателя до 1:40 [45].

Когда требуется максимальное быстродействие, возможность регулирования в широком диапазоне скоростей и возможность управления моментом электродвигателя, используется векторное управление.

1.5.2. Векторное управление

Векторное управление является методом управления электродвигателями переменного тока, не только формирующим гармонические токи (напряжения) фаз (скалярное управление), но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора (углом (фазой) пространственного вектора). Главная идея векторного управления заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и величину и угол пространственного вектора [4; 27].

Векторное управление в сравнении со скалярным обладает более высокой производительностью, позволяет независимо и практически безынерционно регулировать *скорость вращения* и *момент* на валу электродвигателя и избавляет практически от всех недостатков скалярного управления [4].

Преимущества векторного управления:

- высокая точность регулирования скорости;
- плавный старт и плавное вращение двигателя во всем диапазоне частот;
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при изменении нагрузки практически не происходит изменения скорости;
- увеличенный диапазон управления и точность регулирования;
- снижаются потери на нагрев и намагничивание, повышается КПД электродвигателя.

К недостаткам векторного управления можно отнести:

- необходимость задания параметров электродвигателя;
- большие колебания скорости при постоянной нагрузке;
- большая вычислительная сложность.

Общая функциональная схема высокопроизводительной системы управления скоростью двигателя переменного тока показана на рис. 15. Основной схемой являются контуры контроля магнитного потокоцепления и момента вместе с блоком оценки, который может быть реализован различными способами. На выходе инвертора формируется трехфазное напряжение требуемой амплитуды и частоты. При этом внешний контур управления скоростью в значительной степени унифицирован и генерирует управляющие сигналы для регуляторов момента M^* и магнитного потокоцепления Ψ^* (через блок управления потоком). Скорость двигателя может быть измерена датчиком (скорости/положения) или получена посредством оценщика, позволяющего реализовать бездатчиковое управление. Оценщик потокоцепления, момента и скорости – мощное вычислительное устройство, выполняющее расчеты *в режиме реального времени*.

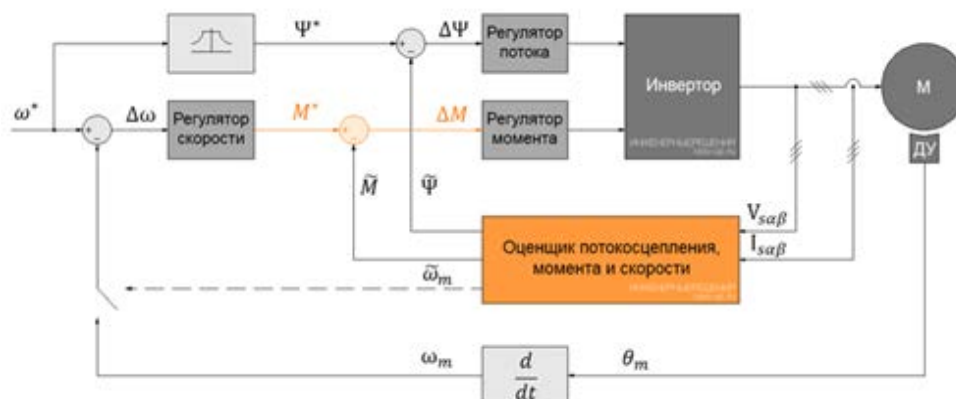


Рис. 15. Общая функциональная схема векторного управления:

М – трехфазный электродвигатель переменного тока; ДУ – датчик положения (угла поворота ротора)

Классификация методов векторного управления. Существующие методы управления моментом представлены для систем управления асинхронными двигателями и синхронными двигателями с постоянными магнитами с синусоидальной обратной ЭДС и могут быть классифицированы различным способом (табл. 3).

Чаще всего методы управления моментом разделяют на следующие группы:

- линейные (ПИ, ПИД) регуляторы;
- нелинейные (гистерезисные) регуляторы.

Таблица 3. Характеристики основных способов управления электродвигателями переменного тока [44]

Метод управления			Диапазон регулирования скорости	Погрешность скорости, %	Время нарастания момента, мс	Пусковой момент	Цена	Описание
скалярный			1:10 (без обратной связи) до 1:40 (с обратной связью)	5–10	не доступно	низкий	очень низкая	имеет медленный отклик при изменении нагрузки и небольшой диапазон регулирования скорости, но при этом прост в реализации
векторный	линейный	полеориентированное управление (ПОУ)	>1:200 (с обратной связью)	0	<1–2	высокий	высокая	позволяет плавно и быстро управлять моментом и скоростью двигателя; требуется информация о положении ротора
		прямое управление моментом (ПУМ) с ПЧМ	>1:200 (с обратной связью)	0	<1–2	высокий	высокая	гибридный метод, разработанный для объединения преимуществ ПОУ и ПУМ
	нелинейный	прямое управление моментом с таблицей включения	>1:200 (с обратной связью)	0	<1	высокий	высокая	имеет высокую динамику и простую схему, но высокие пульсации тока и момента
		прямое самоуправление	>1:200 (с обратной связью)	0	<1–2	высокий	высокая	имеет частоту переключения инвертора ниже, чем у других методов и предназначен для уменьшения потерь при управлении электродвигателями большой мощности

Среди векторного управления наиболее широко используются полеориентированное управление ПОУ (*FOC – field oriented control*) и прямое управление моментом ПУМ (*DTC – direct torque control*).

Полеориентированное управление – метод регулирования, который управляет бесщеточным электродвигателем переменного тока (например, трехфазным АД с кз ротором) как машиной постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТНВ), подразумевая, что поле и момент могут контролироваться отдельно.

ПОУ, предложенное в 1970 г. Блашке [40] и Хассе [41], основано на аналогии с ДПТНВ. В этом двигателе разделены обмотки возбуждения и якоря, потокосцепление контролируется током возбуждения индуктора, а момент независимо управляется регулировкой тока якоря. Таким образом, токи потокосцепления и момента электрически и магнитно разделены.

С другой стороны, бесщеточные электродвигатели переменного тока имеют трехфазную обмотку статора, и вектор тока статора I_s используется для контроля и потокосцепления и момента. Таким образом, ток возбуждения и ток якоря **объединены** в вектор тока статора и не могут контролироваться раздельно. Разъединение может быть достигнуто математически – разложением мгновен-

ного значения вектора тока статора I_s на две компоненты: продольную составляющую тока статора I_{sd} (создающую поле) и поперечную составляющую тока статора I_{sq} (создающую момент) во вращающейся dq системе координат, ориентированной по полю ротора (*R-FOC – rotor flux-oriented control*). Таким образом, управление бесщеточным двигателем переменного тока становится идентичным управлению ДПТНВ и может быть осуществлено, используя инвертор ШИМ с линейным ПИ-регулятором и пространственно-векторной модуляцией напряжения.

В полеориентированном управлении момент и поле контролируются косвенно посредством управления составляющими вектора тока статора [4].

Мгновенные значения токов статора преобразовываются к dq вращающейся системе координат с помощью преобразования Парка $\alpha\beta/dq$, для выполнения которого требуется информация о положении ротора. Поле контролируется через продольную составляющую тока I_{sd} , в то время как момент контролируется через поперечную составляющую тока I_{sq} .

Для определения положения ротора используется либо датчик положения ротора, установленный в электродвигателе, либо реализованный в системе управления бездатчиковый алгоритм управления, который вычисляет информацию о положении ротора в режиме реального времени на основании тех данных, которые имеются в системе управления.

Прямое управление моментом ПУМ подразделяется:

- на прямое управление моментом с пространственно-векторной модуляцией напряжения (ПУМ-ПВМ, английская аббревиатура – *DTC-SVM, direct torque control with voltage space vector modulation*);
- прямое управление моментом с пространственно-векторной модуляцией потока (ПУМ-ПВМП, английская аббревиатура – *DTC-FVM, direct torque control with flux vector modulation*).

В схеме прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией напряжения момент и потокосцепление напрямую управляются в замкнутом контуре, поэтому необходима точная оценка потока и момента двигателя. ПУМ-ПВМ работает на постоянной частоте переключения. Это значительно повышает характеристики системы управления: уменьшает пульсации момента и потока, позволяет уверенно запускать двигатель и работать на низких оборотах, но при этом снижаются динамические характеристики привода (функциональная схема в [4]).

В сравнении с полеориентированным управлением схемы прямого управления моментом имеют следующие преимущества:

- простая схема управления;
- отсутствуют контуры тока и прямое регулирование тока;
- не требуется преобразование координат;
- отсутствует отдельная модуляция напряжения;
- датчик положения не требуется;
- хорошая динамика.

К недостаткам схемы прямого управления моментом относятся:

- требуется точная оценка вектора магнитного потокосцепления статора и момента;
- сильные пульсации момента и тока из-за нелинейного (гистерезисного) регулятора и переменной частоты переключения ключей;
- шум с широким спектром из-за переменной частоты переключения.

Представленная в табл. 3 группа нелинейных регуляторов момента отходит от идеи преобразования координат и управления по аналогии с ДПТНВ, являющегося основой для ПОУ. Нелинейные регуляторы предлагают заменить раздельное управление на непрерывное (гистерезисное) управление, которое соответствует идеологии работы (включено-выключено) полупроводниковых устройств инвертора [4].

К группе нелинейных регуляторов момента относят:

- прямое управление моментом с таблицей включения (ПУМ);
- прямое самоуправление (ПСУ);
- адаптивное прямое управление моментом;
- нейронные сети;
- регуляторы с нечеткой логикой.

Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования скорости АД с короткозамкнутым ротором. Потери мощности при таком регулировании невелики, поскольку минималь-

ны потери скольжения. В замкнутых системах частотного управления могут быть получены характеристики требуемого качества в диапазоне $D > 10000$ [35].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение скалярного управления.
2. Как контролируется скорость АД при скалярном управлении? Для чего в привод со скалярным управлением вводится обратная связь по скорости? Какой диапазон регулирования частоты вращения двигателя достигается в замкнутом электроприводе со скалярным управлением?
3. Дайте определение векторного частотного управления.
4. Приведите общую функциональную схему векторного управления.
5. Охарактеризуйте преимущества и недостатки векторного управления.
6. Представьте полеориентированное векторное управление (ПОУ) с косвенным контролем момента и магнитного поля в двигателе.
7. Охарактеризуйте прямое управления моментом (ПУМ) с пространственно-векторной модуляцией напряжения, где момент и потокосцепление напрямую управляются в замкнутом контуре.
8. Охарактеризуйте прямое управления моментом (ПУМ) с пространственно-векторной модуляцией потока, где момент и потокосцепление напрямую управляются в замкнутом контуре.
9. Преимущества схем ПУМ в сравнении с ПОУ.

1.6. Построение механодинамической модели трехфазного АД с кз ротором при скалярном управлении с использованием пакета *VisSim*

Используемые для моделирования АЭП с частотным управлением подробные модели трехфазных АД с кз ротором содержат большое число электрических элементов, не все параметры которых приводятся в справочниках, а они очень сложны и при их использовании возникают определенные трудности в восприятии смысла модели.

Поэтому актуальной задачей является разработка упрощенной модели трехфазного АД с кз ротором, управляемого от ПЧ. Основные достоинства такой модели – ее простота и использование параметров двигателя, приводимых в справочниках.

Разработка механодинамической модели трехфазного АД с кз ротором осуществлена с использованием пакета *VisSim* (академическая версия) [11].

Модель состоит из трех субмодулей (рис. 16) [13]. В субмодуль 1 заносятся исходные параметры АД и механической части привода. Расчет промежуточных параметров, необходимых для построения механической характеристики двигателя $n[\text{об/мин}] = f(M_{\text{дв}}[\text{Нм}])$, выполняется в субмодуле 2. Значения вращающего момента $M_{\text{дв}}$ и частоты вращения n вала АД рассчитываются в субмодуле 3. Для расчета $M_{\text{дв}}$ используем модифицированную под частотное управление формулу Клосса [43]:

$$M_{\text{дв}} = 2M_{kr} \cdot (U/U_{\text{ном}})^2 \cdot (f/f_{\text{ном}}) / [(s/s_{kr})^2 + (s_{kr}/s)^2],$$

где U , $U_{\text{ном}}$ – соответственно текущее и номинальное значения напряжения на обмотке статора при регулировании угловой скорости АД; f , $f_{\text{ном}}$ – соответственно текущее и номинальное значения частоты напряжения на обмотке статора; s – скольжение, соответствующее текущему значению $M_{\text{дв}}$; s_{kr} – скольжение, соответствующее критическому моменту M_{kr} .

По рассчитанному значению $M_{\text{дв}}$, заданной величине M_c и знаку скорости вращения вычисляются величина вращающего момента M_{vr} , ускорение ε ротора двигателя и частота вращения n (рис. 16).

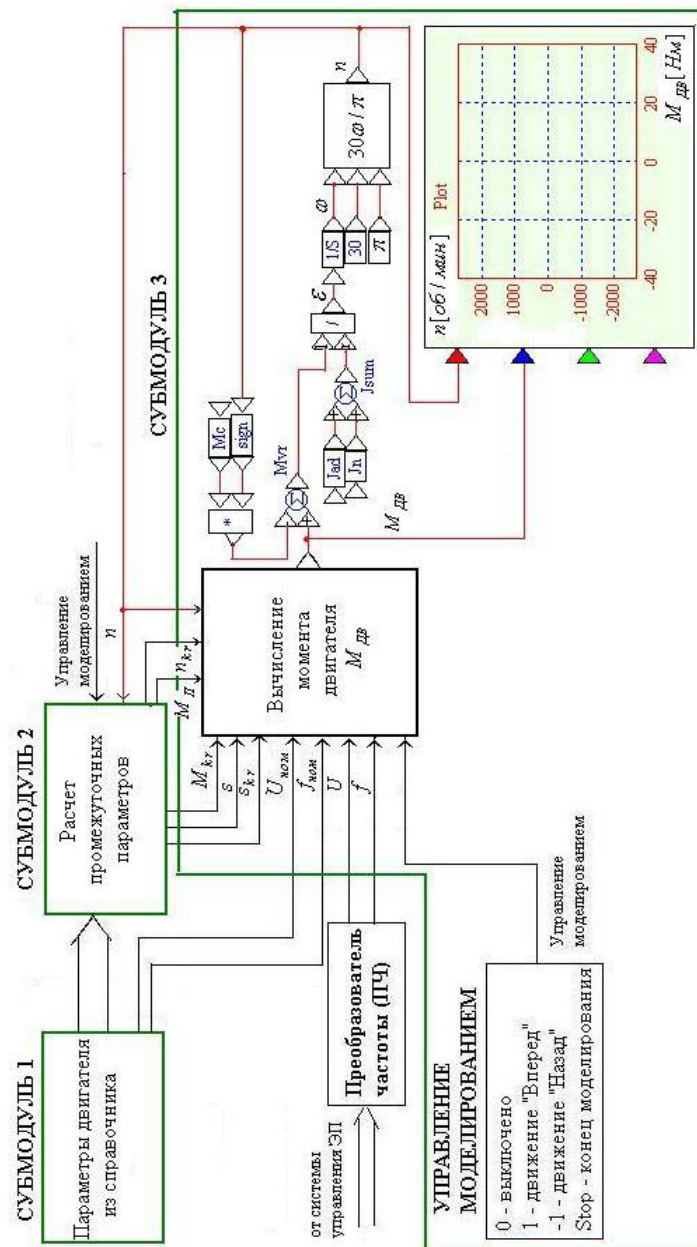


Рис. 16. Механодинамическая модель трехфазного АД с кз ротором при скалярном управлении

С использованием данной модели получены механические характеристики АД типа АИР90L4 (рис. 17).

Расчет значений $M_{дв}$ по формуле Клосса хорошо соответствует экспериментальным характеристикам двигателя на рабочем участке (рис. 17). При пуске $n \leq n_{кр}$ ($n_{кр}$ – частота вращения ротора, соответствующая $M_{кр}$) получаем заниженные значения пускового момента $M_{ндв}$ двигателя. Поэтому при расчетах на участке пуска используем специально подобранную формулу, обеспечивающую прохождение графика через точки, соответствующие номинальным значениям пускового $M_{нном}$ и максимального $M_{крном}$ моментов двигателя при $f = f_{ном}$.

При скалярном управлении АД получаем двухзонное регулирование (рис. 17):

1. При $f \leq f_{ном}$ и $U/f = \text{const}$ обеспечивается постоянная (номинальная) перегрузочная способность привода $M_{кр} = \text{const}$.
2. При частотах $f > f_{ном}$ и $U = U_{ном}$ соотношение $U/f = \text{const}$ не выполняется. В результате с увеличением f значения $M_{кр}$ и $M_{ном}$ уменьшаются, а величина частоты вращения n увеличивается. Регулирование скорости АД ведется с нагрузкой типа «постоянная мощность» при $P = P_{ном}$.

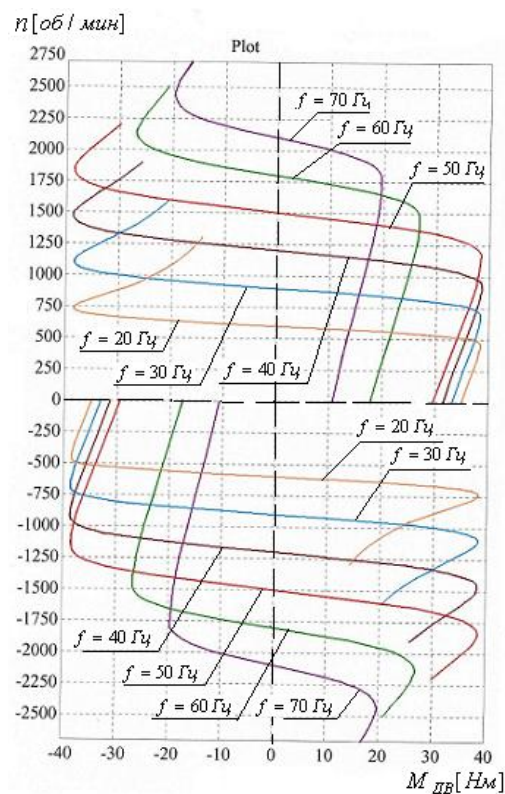


Рис. 17. Механические характеристики АД типа АИР90L4 при скалярном управлении

Предлагаемая модель АД (см. рис. 16) учитывает механическую инерционность электропривода, пренебрегая существенно меньшей электромагнитной инерционностью. Она применима при скалярном управлении АД. С ее использованием могут быть исследованы режимы пуска АД (I и III квадранты на рис. 17), рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть (II и IV квадранты на рис. 17), а также влияния нагрузки (величин J и M_c) на динамику электропривода.

2. Техническая реализация преобразователей частоты в АЭП переменного тока

В современных АЭП переменного тока широкое применение находят статические преобразователи частоты (ПЧ), построенные на статических элементах (полупроводниковых приборах, конденсаторах и т.д.) [26]. Их развитие обусловлено появлением на рынке новых силовых полупроводниковых приборов: тиристоров и транзисторов. Создаваемые на их базе статические ПЧ позволяют повысить технико-экономические показатели регулируемого электропривода: увеличить его КПД и быстродействие.

Статические ПЧ подразделяются на две группы:

- преобразователи частоты с непосредственной связью (НПЧ);
- ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока и автономным (независимым) инвертором.

2.1. Преобразователи частоты с непосредственной связью

В НПЧ инвертор (И) включается в сеть трехфазного переменного тока напряжением U_C частотой f_C (рис. 18) [26]. Напряжение U_1 и частота f_1 на выходе НПЧ регулируются сигналом управления U_y , поступающим на блок управления инвертором (БУИ) от устройства управления электроприводом. Коммутация тока с вентиля на вентиль обеспечивается переменным напряжением источника питания U_C . Такие инверторы называются ведомыми сетью.

НПЧ допускают регулирование частоты f_1 от 0 Гц не более чем до 20 Гц. При более высокой частоте несинусоидальность напряжения на выходе инвертора настолько значительна, что становится причиной недопустимо больших потерь в двигателе. Это свойство ограничивает применение НПЧ в АЭП.

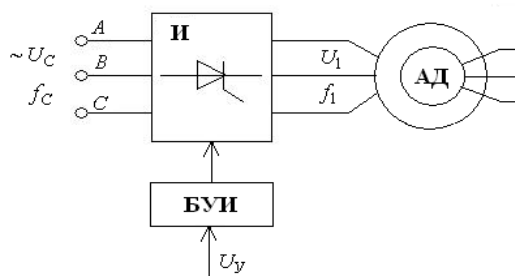


Рис. 18. Функциональная схема преобразователя частоты с непосредственной связью

2.2. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором

Наибольшее применение для частотного регулирования АД получили двухзвенные ПЧ [15; 26], состоящие из управляемого выпрямителя (УВ) и автономного инвертора (АИ) (рис. 19). В данной схеме инвертор – это устройство, преобразующее постоянное напряжение E_0 в трехфазное напряжение переменной амплитуды $U_{1\text{РЕГ}}$ и переменной частоты $f_{1\text{РЕГ}}$.

Управление ПЧ осуществляется от блока управления преобразователем (БУП), на вход которого подается сигнал U_y от устройства управления АЭП. На выходе БУП формируются два управляющих сигнала:

- сигнал U_U , который через блок управления выпрямителем (БУВ) управляет углом включения тиристоров, обеспечивая на выходе УВ требуемое постоянное напряжение E_0 (преобразует трехфазное напряжение сети U_C в постоянное напряжение переменной величины E_0); фильтр (Ф) сглаживает напряжение E_0 , частично устраняя его гармонические составляющие;

- сигнал U_f , который через блок управления инвертором управляет работой автономного инвертора, создавая на его выходе трехфазное напряжение $U_{1\text{РЕГ}}$ регулируемой частоты $f_{1\text{РЕГ}}$ и регулируемой амплитуды, определяемой величиной E_0 .

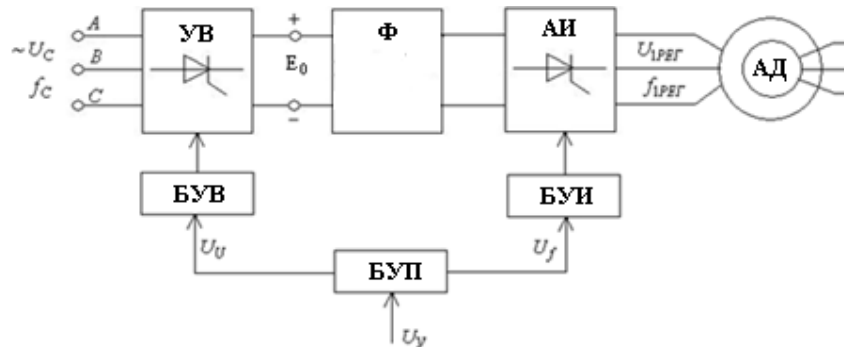


Рис. 19. Функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока

В зависимости от используемого принципа преобразования рассмотрим два типа автономных инверторов: инверторы, генерирующие напряжение прямоугольной формы, и инверторы с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией. Последние обеспечивают наиболее близкую к синусоидальной форму выходного напряжения, что существенно снижает нагрев АД от гармоник напряжения более высоких порядков.

2.2.1. Автономные инверторы со ступенчатой формой напряжения на фазах нагрузки

Рассмотрим принцип получения регулируемой частоты $f_{1\text{РЕГ}}$ (схема УИ на рис. 20) [26]. Пусть трехфазная обмотка статора Z_A, Z_B, Z_C соединена в звезду. Тиристоры УИ $VS1 - VS6$ соединены по мостовой схеме. Они открываются импульсами с БУИ в требуемой последовательности.

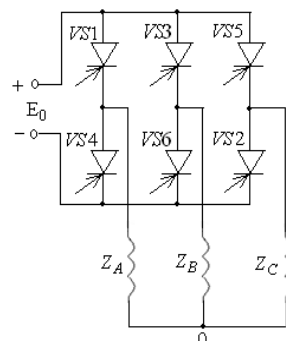


Рис. 20. Упрощенная схема автономного инвертора

Обычно продолжительность открытого состояния тиристора λ составляет половину или треть периода $T_{\text{РЕГ}} = 1 / f_{\text{РЕГ}}$, а сдвиг момента открытия тириستоров друг относительно друга в порядке возрастания номеров составляет шестую часть периода, т.е. $T_{\text{РЕГ}} / 6$. Пусть $\lambda = T_{\text{РЕГ}} / 2$ (рис. 21) и токи фаз I_A, I_B, I_C , проходящие через нечетные тиристоры, отложены в положительном направлении, а через четные – в отрицательном. За время периода выделяют 6 интервалов различных сочетаний открытых и закрытых состояний тириستоров. В каждый момент времени включены 3 тиристора из 6.

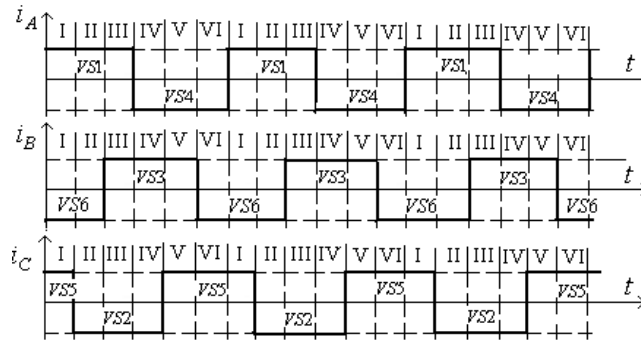


Рис. 21. Диаграмма работы тиристоров при $\lambda = T_{\text{рег}} / 2$

В интервале I открыты VS1, VS6 и VS5. Начала фаз Z_A и Z_C соединены с плюсом E_0 (рис. 19a), а начало Z_B – с минусом E_0 . Поскольку $Z_A = Z_B = Z_C$, то напряжение на Z_A и Z_C будет в 2 раза меньше, чем на Z_B (рис. 22a, рис. 23). В интервале II открыты тиристоры VS1, VS6 и VS2 (рис. 22б, 23). В интервале III открыты тиристоры VS1, VS3 и VS5 (рис. 22в, 23) и т.д. График изменения напряжения на фазах нагрузки при $\lambda = T_{\text{рег}} / 2$ имеет ступенчатую форму, и оно является переменным. Максимумы напряжений сдвинуты по фазам на треть периода регулируемой частоты, т.е. на нагрузке получается стандартная система трехфазного напряжения переменного тока несинусоидальной формы.

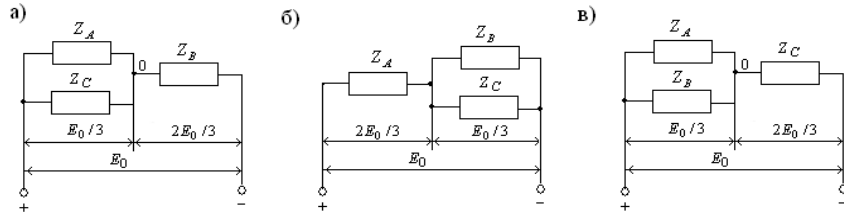


Рис. 22. Схемы соединения нагрузки:

(a) – на интервале I, (б) – на интервале II, (в) – на интервале III

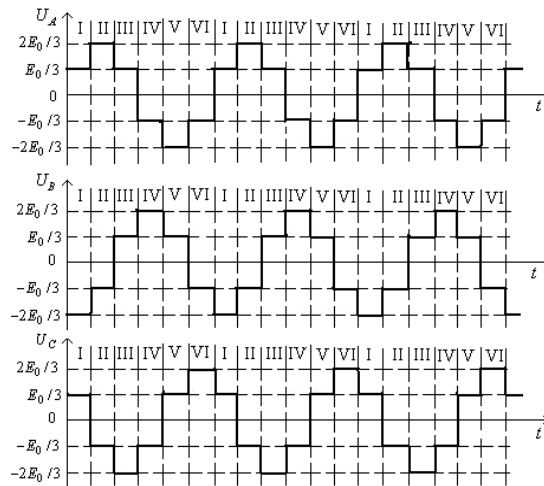


Рис. 23. Напряжение на фазах обмоток статора при их соединении в звезду и $\lambda = T_{\text{рег}} / 2$

Рассмотрим случай, когда продолжительность открытого состояния тиристора λ составляет треть периода $T_{\text{рег}}$ ($\lambda = T_{\text{рег}}/3$), а обмотка статора соединена в звезду. Из диаграммы работы тиристоров, представленной на рис. 24, видно, что в каждый интервал времени открыты лишь два тиристора. В результате в каждом интервале времени две фазы нагрузки оказываются последовательно включенными на напряжение E_0 , а третья фаза оказывается отключенной. Соответственно напряжение на каждой из последовательно соединенных фаз равно $E_0/2$, а на третьей равно нулю (рис. 25).

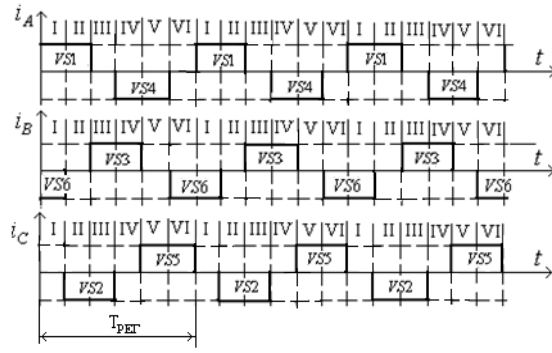


Рис. 24. Диаграмма работы тиристоров при $\lambda = T_{\text{REF}}/3$

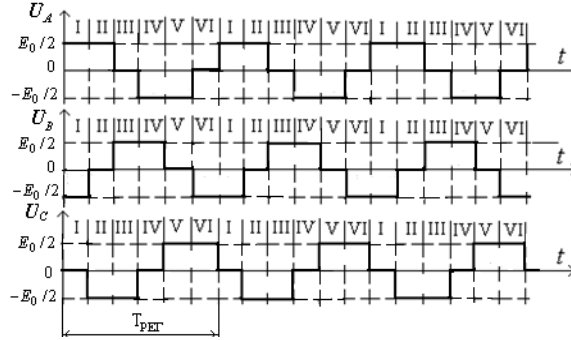


Рис. 25. Напряжение на фазах обмоток статора при их соединении в звезду и $\lambda = T_{\text{REF}}/3$

При соединении обмоток статора в треугольник и $\lambda = T_{\text{REF}}/2$ форма напряжения на фазах обмотки аналогична кривым на рис. 25, но с амплитудой, равной E_0 . При соединении фазных обмоток статора в треугольник и $\lambda = T_{\text{REF}}/3$ форма напряжений на фазах обмотки статора повторяет кривые на рис. 23, но с заменой $E_0/3$ на $E_0/2$ и $2E_0/3$ на E_0 .

2.2.2. Автономные инверторы с широтно-импульсной модуляцией

При питании обмотки статора трехфазным несинусоидальным напряжением (рис. 23, 25) имеют место большие потери в АД от высших гармоник тока. Поэтому в современных ПЧ со звеном постоянного тока, как правило, используются инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Такие инверторы обеспечивают не только широкий диапазон регулирования в них напряжения и частоты, но и получение формы выходного тока, близкой к синусоидальной.

Для изменения амплитуды и формы напряжения на фазовой обмотке статора (например, U_A) раздробим каждый период T на n равных интервалов с продолжительностью каждого $\tau = T/n = t_{i1} + t_{i2}$ (рис. 26a), где t_{i1} – интервал времени, в течение которого к нагрузке прикладывается полное напряжение U_A ; t_{i2} – интервал времени, в течение которого к нагрузке прикладывается нулевое напряжение [15]. Тогда к нагрузке на каждом интервале i будет прикладываться не полное напряжение U_A , а лишь его часть:

$$U_{icp} = U_A \cdot \frac{t_{i1}}{t_{i1} + t_{i2}} = U_A \cdot \frac{t_{i1}}{\tau} = U \cdot \varepsilon_i.$$

Изменяя на каждом интервале относительную ширину импульса $\varepsilon_i = t_{i1}/\tau$, можно управлять средним за интервал напряжением, т.е. формировать на каждом полупериоде нужную форму напряжения (рис. 26б). С увеличением n будет уменьшаться τ и ступенчатая кривая будет приближаться к плавной.

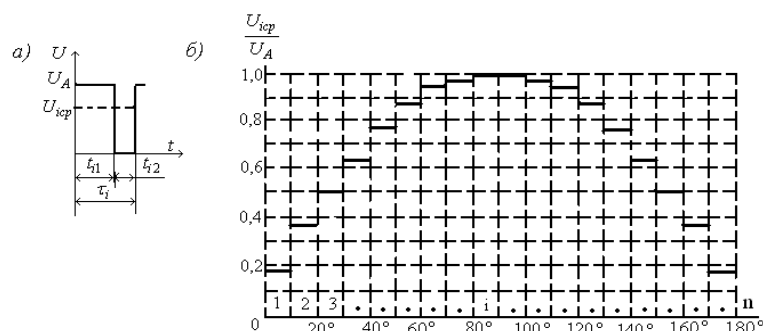


Рис. 26. а – ШИМ на интервале i ; б – ШИМ на половине периода выходной частоты

При использовании инверторов с ШИМ в схеме ПЧ может быть применен неуправляемый выпрямитель (амплитуда напряжения регулируется в инверторе за счет ШИМ), что упрощает преобразователь и позволяет получить близкий к 1 коэффициент мощности ПЧ.

Полностью реализовать широкие возможности ШИМ удалось лишь в последние 20–25 лет [15] с появлением на рынке совершенных ключей, например, транзисторных модулей *IGBT* (рис. 27а) с напряжением до 1200 В, током до 600 А и частотой коммутации до 30 кГц, а также микропроцессорных средств управления ими – встраиваемых однокристальных микропроцессорных контроллеров (МК) класса *MC (Motor Control)* [32]. Поскольку *IGBT*-транзисторы могут переключаться при значительно больших частотах, чем тиристорные ключи, форма тока, протекающего через обмотки двигателя, становится значительно ближе к синусоидальной. Очевидно, что чем выше несущая частота ШИМ, тем меньше амплитуда колебаний тока в трехфазной обмотке статора. Однако при работе на индуктивную нагрузку чрезмерное увеличение несущей частоты может привести к перегреву ключей инвертора, т.к. чем выше частота коммутации ключей, тем выше потери в них.

Транзисторный модуль *IGBT* состоит из транзистора *VT* с изолированным затвором и встроенного обратного диода *VD* (рис. 27а). Автономный инвертор (рис. 27б) питается постоянным напряжением E_0 , конденсатор (*C*) выполняет функцию сглаживающего фильтра. Индуктивный характер нагрузки учитывается подключением параллельно транзисторам *VT1 – VT6* обратных диодов *VD1 – VD6*, обеспечивающих непрерывность цепи протекания тока в фазовых обмотках статора при отключении их от источника питания (закрытии соответствующих транзисторов) и возврата запасенной электромагнитной энергии в конденсатор.

Регулирование частоты трехфазного напряжения осуществляется путем изменения частоты переключения транзисторов модулей-ключей аналогично схеме на рис. 21.

В АЭП, имеющих в цикле работы участки рекуперации энергии, или высокую интенсивность тормозных режимов, для эффективного торможения предусмотрен специальный узел сброса энергии, состоящий из дополнительного ключа *VT7* и резистора *R1* [17]. Ключ *VT7* открывается при превышении напряжения на емкости *C* сверх допустимого значения, вследствие чего обеспечивается «сброс» энергии в резистор *R1*, рассеивающий эту энергию.

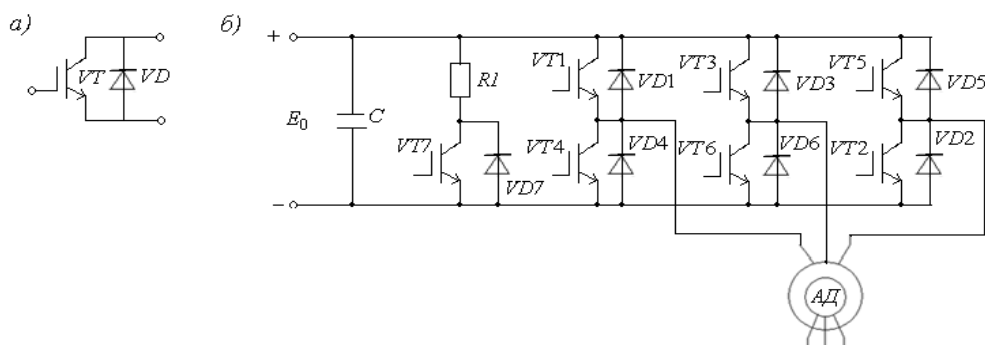


Рис. 27. Использование модуля-ключа в автономном инверторе:

а – схема модуля-ключа на базе транзистора и обратного диода; б – схема силовой части инвертора, выполненного на этих модулях

2.2.3. Автономные инверторы напряжения и тока

АИ делятся на два класса – инверторы напряжения и тока [18; 26]. Автономные инверторы напряжения (АИН, рис. 28) имеют в качестве источника питания источник напряжения. Если АИН питаются от УВ, то на выходе выпрямителя устанавливается конденсатор C_0 большой емкости. При этом с изменением тока нагрузки напряжение АИН практически не изменяется, что обуславливает предпочтительное использование АИН в разомкнутых приводах и при управлении группой регулируемых двигателей. При использовании АИН управляющими воздействиями на АД являются частота $f_{1\text{пер}}$ и напряжение $U_{1\text{пер}}$.

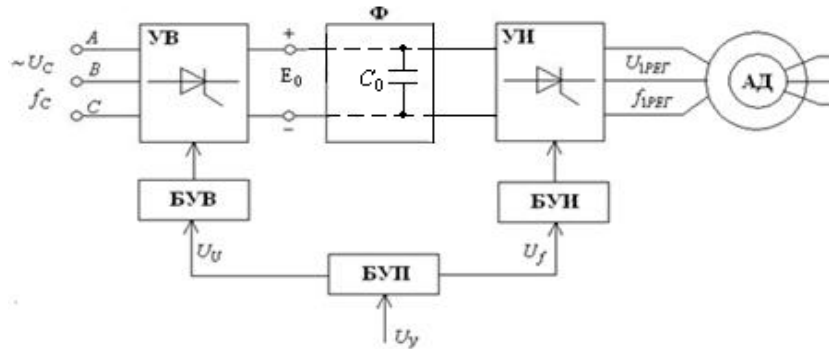


Рис. 28. Функциональная схема автономного инвертора напряжения (АИН)

Автономные инверторы тока (АИТ, рис. 29) обладают свойствами источников тока, для чего их питание осуществляется от источника тока. На выходе УВ для придания ему такого свойства устанавливается дроссель L_0 большой индуктивности. ПЧ с АИТ позволяют создавать быстродействующие реверсивные электроприводы, работающие в интенсивном повторно-кратковременном режиме с частыми переходными процессами. При использовании АИТ управляющими воздействиями на АД являются частота $f_{1\text{пер}}$ и ток $I_{1\text{пер}}$ в обмотке статора.

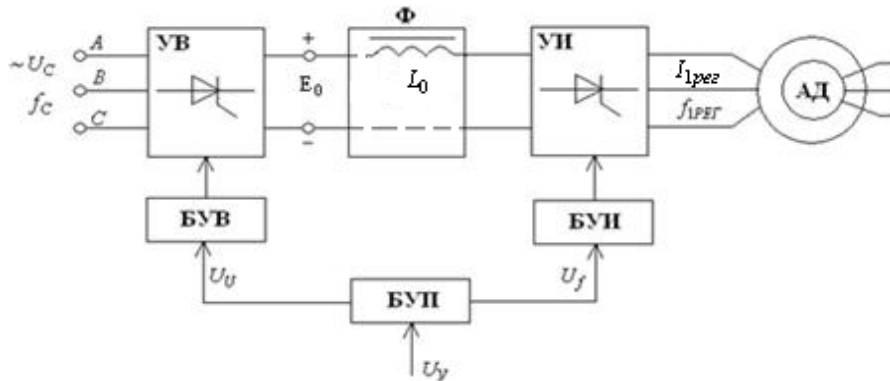


Рис. 29. Функциональная схема автономного инвертора тока (АИТ)

2.2.4. Типовые практические схемы ПЧ с АИН и АИТ

Одна из распространенных практических схем силовой части электропривода с АИН приведена на рис. 30 [26]. Тиристоры $VS7 - VS12$ образуют управляемый выпрямитель (УВ). На выходе УВ включены катушка индуктивности фильтра L_0 и конденсатор C_0 , обеспечивающий вместе с обратными диодами $VD7 - VD12$ циркуляцию реактивной мощности. Тиристоры $VS1 - VS6$ образуют основную схему инвертора, алгоритм их работы был рассмотрен выше (см. рис. 21). Поскольку автономный инвертор питается от источника постоянного напряжения E_0 , то для закрытия основных тиристоров $VS1 - VS6$ в нужные моменты времени предусмотрены цепи искусственной коммутации, образованные конденсаторами C и индуктивностями L вместе с диодами $VD1 - VD6$. Амплитуда постоянного напряжения E_0 формируется на выходе УВ, а регулируемая частота напряжения на обмотке статора определяется частотой коммутации тиристоров $VS1 - VS6$.

Приведенная на рис. 30 схема ПЧ хотя и является распространенной, но далеко не единственной. На практике нашли применение и другие схемы, отличающиеся способами регулирования напряжения и видами искусственной коммутации тиристоров автономного инвертора. Однако общие принципы работы ПЧ остаются теми же.

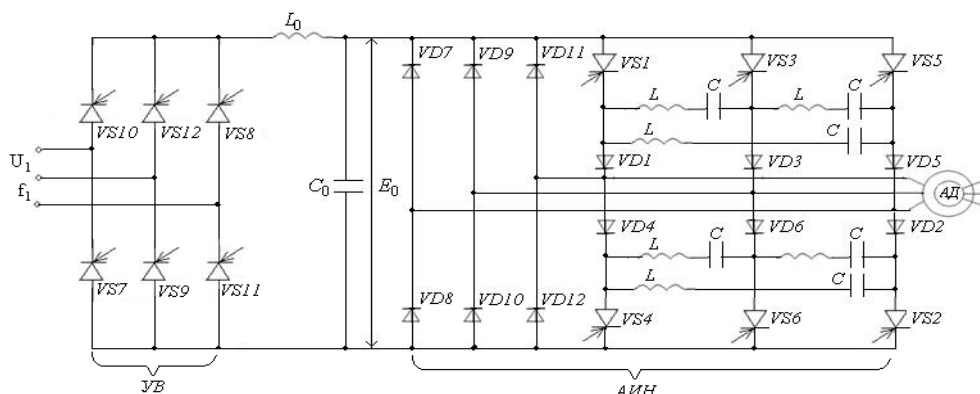


Рис. 30. Практическая схема ПЧ со звеном постоянного тока в АИТ

На практике широкое распространение получили также асинхронные электроприводы на базе АИТ [26]. С помощью обратных связей по току и скорости формируются статические и динамические характеристики быстродействующих электроприводов с заданным высоким качеством.

Упрощенная схема замкнутой системы частотно-токового управления АД приведена на рис. 31. Назначение тиристоров, диодов и конденсаторов УВ и АИТ такое же, как и для схемы рис. 30. Другие элементы схемы имеют следующие обозначения: СУВ и СУИ – схемы управления тиристорами УВ и АИТ соответственно; РТ – регулятор тока статора; ДТ – датчик тока статора; ДС – датчик скорости; УО – усилитель-ограничитель; ФП – функциональный преобразователь.

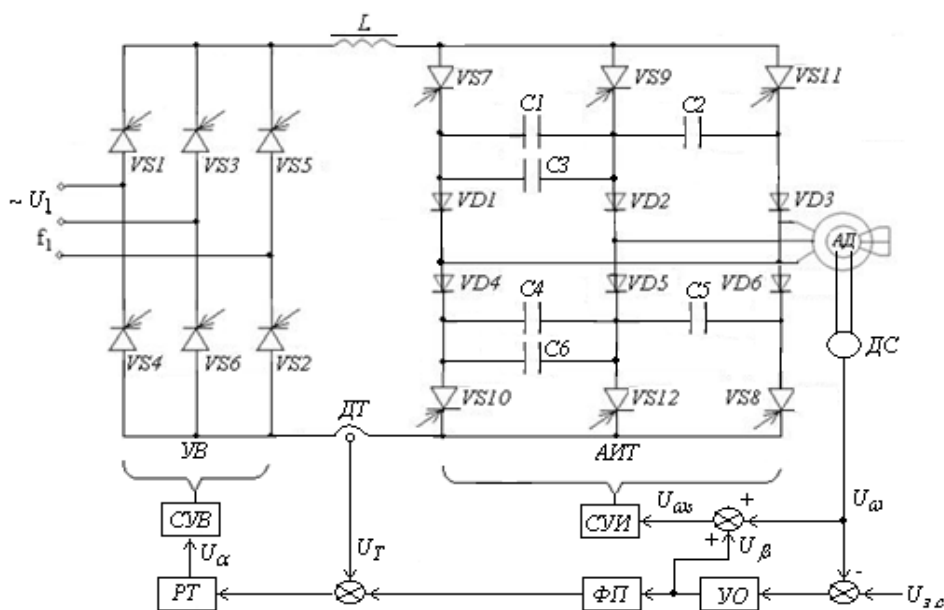


Рис. 31. Асинхронный электропривод с АИТ

Схема работает следующим образом. Задающий сигнал U_{3c} определяет частоту переключения тиристоров АИТ и соответственно частоту тока статора АД. После вычитания из U_{3c} сигнала обратной связи по скорости U_{ω} формируется сигнал U_{β} , пропорциональный относительной частоте ротора $\beta = f_2 / f_{1ном}$. Величину β называют также абсолютным скольжением. Она связана со скольжением АД выражением $\beta = \alpha \cdot s$, где $\alpha = f_1 / f_{1ном}$.

Сигнал U_{β} , пройдя через УО, вместе с сигналом U_{ω} поступает на вход СУИ. Частота на выходе АИТ определяется сигналом $U_{os} = U_{\omega} + U_{\beta}$. СУИ настроена таким образом, что, пока УО работает

в линейной зоне, частота на выходе АИТ постоянна и не зависит от нагрузки ($U_{ос} = U_{3.с}$). Двигатель при этом имеет жесткие механические характеристики (рис. 32).

Сигнал U_{β} после прохождения через ФП является задающим сигналом для контура регулирования тока. Поскольку этот сигнал пропорционален абсолютному скольжению, то ток АД при всех частотах будет ему пропорционален.

При резких изменениях задающего сигнала $U_{3.с}$ или при перегрузке двигателя УО входит в зону ограничения (постоянства) своего выходного сигнала U_{β} , ограничивая на требуемом уровне задание тока. Двигатель работает при любой скорости в этом режиме с постоянными значениями тока и абсолютного скольжения (механическая характеристика АД становится мягкой).

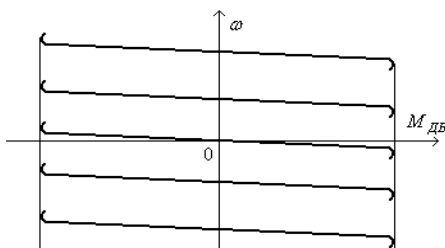


Рис. 32. Механические характеристики реверсивной системы «ПЧ с АИТ – АД»

Современные ПЧ со звеном постоянного тока дополнены функцией **энергосбережения**. Такие ПЧ отслеживают силу потребляемого двигателем тока. Если нагрузка электропривода снижается, напряжение на выходе ПЧ понижается до минимально допустимого значения для данной нагрузки двигателя. Это способствует уменьшению потерь и повышению КПД электропривода. Функция энергосбережения наиболее эффективна в электроприводах, работающих с переменной нагрузкой. Экономия электроэнергии в этом случае может достигнуть 50%.

В качестве характерного примера рассмотрим ПЧ серии «Универсал» [1; 18], предназначенные для регулирования частоты вращения механизмов, использующих в качестве приводных АД с короткозамкнутым ротором. ПЧ «Универсал» выпускают в диапазоне мощностей от 0,55 до 160 кВт. Они обеспечивают регулирование напряжения на выходе от $0,05U_{ном}$ до $U_{ном}$ и регулирование частоты этого напряжения от 2 до 512 Гц. Диапазон регулирования частоты вращения $D = 10$ для электроприводов без обратной связи и $D = 30$ для замкнутых электроприводов (с обратной связью по скорости).

На рис. 33 показаны основные элементы ПЧ «Универсал». Помимо блоков УВ и АИ преобразователь содержит комплект измерительных трансформаторов тока TA и напряжения TV . Сигналы с выходов трансформаторов, несущие информацию о реальной токовой нагрузке автономного инвертора АИ и двигателя АД, поступают на блок управления (БУ), в котором формируются сигналы управления, соответствующие нагрузке двигателя. Вырабатываемые БУ сигналы поступают на вход преобразователя, создавая оптимальный режим его работы. Обеспечиваются энергосберегающие и защитные функции преобразователя, «мягкий» пуск двигателя с заданными значениями пусковых токов. Электроприводы с таким ПЧ не нуждаются в применении специальных защитно-пусковых устройств. Блок управления допускает подключение компьютера, что обеспечивает дополнительные возможности ПЧ, например работу преобразователя в соответствии с технологической компьютерной программой.

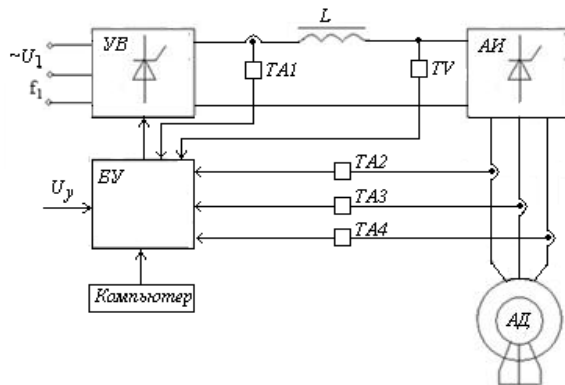


Рис. 33. Функциональная схема ПЧ серии «Универсал»

В настоящее время промышленность выпускает большую номенклатуру ПЧ, что позволяет для каждого конкретного электропривода выбрать наиболее рациональный вариант преобразователя как по техническим, так и по экономическим показателям.

2.2.5. Выбор преобразователя частоты для АД

От правильного выбора ПЧ зависит эффективность и ресурс работы всего электропривода в целом. Если мощность ПЧ будет завышена, он не сможет в должной мере обеспечить защиту двигателя. Если мощность ПЧ мала, он не сможет обеспечить высокودинамичный режим работы и из-за перегрузок может выйти из строя.

При выборе ПЧ надо руководствоваться не только мощностью подключаемого двигателя, но и диапазоном рабочих скоростей двигателя, диапазоном рабочих моментов вращения, характером нагрузки и циклограммой работы [5].

В табл. 4 знаком «+» отмечены факторы, которые надо рассмотреть при выборе ПЧ.

Таблица 4. Факторы для рассмотрения при выборе ПЧ для АД

Классификация		Связанные характеристики			
		скорость и момент	параметры времени	перегруз. способность	пусковой момент
тип нагрузки	фрикционная нагрузка и подъем груза, вязкая нагрузка, высокоинерционная нагрузка, нагрузка с передачей и накоплением энергии	+			+
характеристики скорости и момента	постоянный момент, постоянная скорость, уменьшающийся момент, уменьшающаяся скорость	+	+		
характер нагрузки	постоянная нагрузка, ударная нагрузка, периодически изменяющаяся нагрузка, высокий начальный момент, низкий начальный момент	+	+	+	+
продолжительный режим на номинальной скорости, продолжительный режим на низкой/средней скорости, повторно-кратковременный режим			+	+	
максимальный выходной ток (мгновенный), постоянный выходной ток (продолжительный)		+		+	
максимальная частота, номинальная частота		+			
мощность или импеданс источника питания, скачки напряжения или дисбаланс фаз, число фаз, частота				+	+
механическое трение, потери в проводниках				+	+
изменение рабочего цикла			+		

2.2.5.1. Выбор преобразователя частоты по энергетической совместимости при работе с одним АД

Определим последовательность выбора промышленного ПЧ при управлении одним АД [5].

1. Вычисляем полную потребляемую двигателем мощность в установившемся режиме

$$S_{\text{потр}} [\text{kVA}] = \frac{k \cdot P_{\text{ном}}}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (21)$$

где $k = 0.95 \div 1.05$ – коэффициент искажения тока при широтно-импульсной модуляции напряжения на выходе ПЧ, в первом приближении можно принять $k = 1$;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

η – номинальный КПД двигателя;

$\cos \varphi$ – паспортный коэффициент мощности двигателя.

2. Определяем ток $I_{\text{потр}}$, потребляемый двигателем от ПЧ в установившемся режиме при трехфазном напряжении сети $U = 220/380 \text{ В}$,

$$I_{\text{потр}} [\text{А}] = \frac{k \cdot n \cdot M_{\text{ст}}}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}}, \quad (22)$$

где n [об/мин] – частота вращения вала двигателя в установившемся режиме;

$M_{\text{ст}}$ [Нм] – статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя.

3. Предварительно выбираем тип ПЧ при одновременном выполнении двух условий:

$$P_{\text{номПЧ}} \geq S_{\text{потр}} \text{ и } I_{\text{номПЧ}} \geq I_{\text{потр}}. \quad (23)$$

4. Проверяем предварительно выбранный ПЧ в пусковом режиме.

Условия пуска АД при питании напрямую от сети и при питании от ПЧ отличаются. Это объясняется тем, что пусковой ток двигателя, потребляемый от ПЧ ($I_{\text{пускПЧ}}$), ограничивается преобразователем по времени действия (обычно до 10 и до 60 с) и по уровню (120–200% от номинального тока ПЧ). Например, для ПЧ типа ES024 [35] при продолжительности времени пуска $t_{\text{пуск}} \leq 10 \text{ с}$ допустимое значение тока $I_{\text{пускПЧ}} = 1.8 I_{\text{номПЧ}}$, при $t_{\text{пуск}} \leq 60 \text{ с}$ допустимое значение тока $I_{\text{пускПЧ}} = 1.5 I_{\text{номПЧ}}$, а при $t_{\text{пуск}} > 60 \text{ с}$ допустимое значение тока $I_{\text{пускПЧ}} = I_{\text{номПЧ}}$.

Если требуется быстро разогнать инерционную нагрузку, потребуется ПЧ большей номинальной мощности.

При плавном пуске двигателя от ПЧ (с плавным нарастанием частоты питающего напряжения) установкой времени разгона пусковой ток может быть снижен до номинального или реально потребляемого двигателем в установившемся режиме.

Пусть требуется разогнать двигатель при питании его от ПЧ от меньшей скорости до большей за заданное время $t_{\text{пуск}}$. Тогда ток $I_{\text{потр.л}}$, который двигатель потребляет при линейном разгоне, определяется из выражения

$$I_{\text{потр.л}} [\text{А}] = \frac{k \cdot n}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}), \quad (24)$$

где $M_{\text{дин}} [\text{Нм}] = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n}{t_{\text{пуск}}}$ – динамический момент, возникающий при разгоне инерционной нагрузки;

$J [\text{кгм}^2]$ – сумма моментов инерции ротора двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции нагрузки.

Требуемая полная пусковая мощность ПЧ $S_{\text{пускПЧ}}$ определяется по формуле

$$S_{\text{пускПЧ}} [\text{кВА}] = \frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}). \quad (25)$$

5. В режиме пуска для выбираемого ПЧ должны соблюдаться условия

$$I_{\text{пускПЧ}} \geq I_{\text{потр.л}}, \quad (26)$$

где $I_{\text{пускПЧ}}$ – допустимое значение тока на выходе ПЧ при заданном времени пуска $t_{\text{пуск}}$,

$$1.5 \cdot P_{\text{номПЧ}} \geq S_{\text{пускПЧ}}. \quad (27)$$

Если условия (26) и (27) соблюдаются, то окончательно выбираем данный ПЧ. Рассмотрим пример выбора ПЧ для управления трехфазным АД с кз ротором.

Пусть требуется выбрать ПЧ для АД с кз ротором типа МТКН 411-6, являющегося исполнительным двигателем для электропривода с приведенным моментом сопротивления $M_{\text{ст}} = 220 \text{ Нм}$; приведенным моментом инерции нагрузки $J_{\text{н}} = 2 \text{ кгм}^2$; установившейся скоростью $n_{\text{уст}} = 935 \text{ об/мин}$; временем разгона до установившейся скорости $t_{\text{пуск}} = 2.4 \text{ с}$.

Параметры двигателя: $P_{\text{ном}} = 22 \text{ кВт}$; $J_{\text{дв}} = 0.52 \text{ кгм}^2$; $\eta = 87\%$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0.8$; $U = 220 \text{ В}$.

1. По формуле (21) вычисляем полную потребляемую двигателем мощность в установившемся режиме,

$$S_{\text{потр}} [\text{kVA}] = \frac{k \cdot P_{\text{ном}}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1 \cdot 22}{0.87 \cdot 0.8} = 31.6 \text{ kVA}.$$

2. По формуле (22) определяем ток $I_{\text{потр}}$, потребляемый двигателем от ПЧ в установившемся режиме

$$I_{\text{потр}} [\text{A}] = \frac{k \cdot n \cdot M_{\text{ст}}}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{935 \cdot 220}{9.55 \cdot 0.87 \cdot 0.8 \cdot 220 \cdot 1.73} = 81.4 \text{ A}.$$

3. Предварительно выбираем тип ПЧ при одновременном выполнении условий (23):

$$P_{\text{номПЧ}} \geq 31.6 \text{ kVA} \text{ и } I_{\text{номПЧ}} \geq 81.4 \text{ A}.$$

Указанным условиям удовлетворяет ПЧ типа ES024-04-0900A с номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 45 \text{ кВт}$ и номинальным выходным током $I_{\text{номПЧ}} = 90 \text{ A}$.

4. Проверяем предварительно выбранный ПЧ в пусковом режиме (на перегрузочную способность).

Поскольку заданное время пуска $t_{\text{пуск}} = 2.4 \text{ с} < 10 \text{ с}$, то допустимый выходной ток ПЧ при разгоне $I_{\text{пускПЧ}} = 1.8 I_{\text{номПЧ}} = 1.8 \cdot 90 = 162 \text{ A}$.

Из выражения (24) определим потребляемый двигателем при разгоне ток:

$$I_{\text{потр.н}} [\text{A}] = \frac{k \cdot n}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}) = \frac{935}{9.55 \cdot 0.87 \cdot 0.8 \cdot 220 \cdot 1.73} \cdot (220 + 103) = 119.5 \text{ A},$$

$$\text{где } M_{\text{дин}} [\text{Нм}] = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n}{t_{\text{пуск}}} = \frac{(2 + 0.52) \cdot 935}{9.55 \cdot 2.4} = 103 \text{ Нм}.$$

Из выражения (25) определяем полную пусковую мощность ПЧ:

$$S_{\text{пускПЧ}} [\text{kVA}] = \frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}) = \frac{935}{9550 \cdot 0.87 \cdot 0.8} \cdot (220 + 103) = 45.4 \text{ кВт}.$$

5. Проверяем выполнение условий (26) и (27).

Условие $I_{\text{пускПЧ}} \geq I_{\text{потр.н}}$ выполняется, т.к. $162 \text{ A} > 119.5 \text{ A}$, условие $1.5 \cdot P_{\text{номПЧ}} \geq S_{\text{пускПЧ}}$ выполняется, т.к. $67.5 \text{ кВт} > 45.4 \text{ кВт}$.

Поскольку условия (26) и (27) выполняются, окончательно выбираем ПЧ типа ES024-04-0900A.

2.2.5.2. Выбор преобразователя частоты по энергетической совместимости при работе с несколькими АД

При работе ПЧ с несколькими АД выбор ПЧ производится на основании соблюдения неравенств, приведенных в табл. 5 [5].

Таблица 5. Соотношения для выбора ПЧ при работе с несколькими АД

Параметр	Формула, условие	
Полная пусковая мощность, требуемая двигателю	$S_{\text{пуск дв}} = S_{\text{ном}} \cdot \left[1 + \frac{N_s}{N} (K_s - 1) \right]$	
Пусковой ток, требуемый двигателю	$I_{\text{пуск дв}} = N \cdot I_{\text{ном}} \cdot \left[1 + \frac{N_s}{N} \cdot (K_s - 1) \right]$	
	при разгоне до 60 с	при разгоне свыше 60 с
	$S_{\text{пуск дв}} \leq 1.5 \cdot P_{\text{ном ПЧ}}$	$S_{\text{пуск дв}} \leq P_{\text{ном ПЧ}}$
	$I_{\text{пуск дв}} \leq 1.5 \cdot I_{\text{ном ПЧ}}$	$I_{\text{пуск дв}} \leq I_{\text{ном ПЧ}}$

N – количество двигателей, параллельно подсоединенных к одному ПЧ, шт.;

N_S – количество одновременно запускаемых двигателей, шт.;

$K_S = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$ – коэффициент кратности пускового тока двигателя;

$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность двигателя по паспорту, кВА;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток двигателя по паспорту, А.

2.2.5.3. Некоторые замечания по выбору ПЧ и установке его параметров [5]

1. Если используется специальный двигатель или более одного двигателя, подключенных параллельно к одному ПЧ, следует выбирать ПЧ с номинальным током не меньшим 1.25 номинального тока специального двигателя или суммы номинальных токов всех подключенных в параллель двигателей.
2. Характеристики пуска и разгона/торможения двигателя ограничиваются номинальным током и перегрузочной способностью ПЧ. Если требуется высокий пусковой момент (например, для подъемников, центрифуг и т.д.), выбирайте ПЧ с запасом по мощности или используйте и ПЧ и двигатель большей мощности.
3. Если произойдет отключение ПЧ из-за срабатывания одной из его защит, то напряжение с выхода инвертора будет снято, а двигатель будет тормозиться на свободном выбеге. При необходимости быстрой остановки двигателя при аварийном отключении следует использовать внешний механический тормоз.
4. Количество повторных пусков ПЧ командами ПУСК/СТОП неограничено, если инвертор не перегружается. Иначе каждый последующий пуск двигателя от ПЧ должен осуществляться не ранее, чем через 10–15 минут (время, необходимое для охлаждения полупроводникового IGBT-модуля). При необходимости осуществления пуска двигателя чаще, чем 1 раз за 5–10 минут, нужно выбрать ПЧ большего номинала или работать при менее тяжелом режиме (меньший пусковой ток, работа с выходным током меньше номинального, низкая температура окружающего воздуха).
5. Большинство ПЧ может выдать выходную частоту до 400 Гц при задании ее с цифровой панели. Ошибочное задание высокой частоты может привести к разрушению механизма. Для предотвращения таких ситуаций рекомендуется устанавливать в параметрах жесткое ограничение выходной частоты.
6. Длительная работа двигателя на низкой частоте или высокий уровень напряжения торможения постоянным током может привести к перегреву двигателя. Рекомендуется использовать в таких случаях дополнительную вентиляцию двигателя.
7. Если активизирована функция ограничения перенапряжения в звене постоянного тока, то время торможения может автоматически увеличиваться. При необходимости быстрого торможения высокоинерционных нагрузок надо использовать тормозной резистор или выбрать ПЧ большей мощности.

2.2.5.4. Некоторые замечания по эксплуатации ПЧ

При работе ПЧ со стандартным 3-фазным АД следует иметь в виду [5] следующие особенности:

1. При питании АД от ПЧ потери в двигателе меньше, чем при его непосредственном питании от сети переменного тока, за счет снижения реактивной составляющей тока.
2. При работе стандартного АД на скорости ниже номинальной (особенно с моментом, близким к номинальному) возможен перегрев двигателя из-за уменьшения охлаждения за счет снижения скорости обдува собственным вентилятором. Возможное решение проблемы – применение внешнего независимого вентилятора.
3. Стандартный АД может обеспечить длительный максимальный момент (из условий теплового режима) только на номинальной частоте вращения. Поэтому при снижении скорости вращения необходимо уменьшать нагрузку на валу двигателя. Допустимые нагрузки для стандартного АД приведены на рис. 34.
4. Для обеспечения длительных номинальных моментов при низких скоростях вращения следует использовать специальные двигатели (возможно успешное применение стандартных двигателей с номинальными частотами 750, 1000, 1500 об/мин) или двигателей завышенной мощности.

5. В связи с использованием в ПЧ высокой несущей частоты ШИМ обратите внимание на следующие факторы:
 - резонансная механическая вибрация: используйте антивибрационные резиновые демпферы на оборудовании;
 - дисбаланс ротора двигателя: особенно при работе на скоростях выше номинальной;
 - избегайте работы на резонансных частотах.
6. Вентилятор двигателя будет сильнее шуметь на скоростях выше номинальной.
7. При использовании стандартного АД на больших частотах, которые обеспечивает ПЧ, следует учитывать ограничения, связанные с ресурсом подшипников и повышенной вибрации из-за остаточного дисбаланса ротора и исполнительного механизма.



Рис. 34. Допустимые нагрузки для стандартного АД при скоростях вращения, меньших номинальной

Контрольные вопросы

1. Назовите типы ПЧ.
2. Представьте функциональную схему ПЧ с непосредственной связью. Чем ограничивается его применение в АЭП?
3. Поясните функциональную схему преобразователя частоты со звеном постоянного тока и принцип регулирования частоты и напряжения.
4. Поясните принцип действия мостового автономного инвертора.
5. Поясните функциональные схемы и области применения автономных инверторов напряжения (АИН) и тока (АИТ) в электроприводах.
6. Поясните принцип широтно-импульсного регулирования напряжения АИН.
7. Поясните работу АИН с широтно-импульсным регулированием и рекуперацией энергии, выполненным на базе транзисторных модулей *IGBT*.
8. Поясните работу практической схемы силовой части электропривода с АИН.
9. Поясните работу практической схемы асинхронного электропривода с АИТ.
10. Поясните работу современного ПЧ серии «Универсал» с функцией энергосбережения.
11. Чем отличаются условия пуска АД от сети и от ПЧ?

3. Трехфазные синхронные двигатели

Синхронный двигатель (СД) – это электрическая машина, скорость вращения ротора которой ω_0 равна частоте вращения магнитного поля $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$, где f_1 – частота питающей сети, p – число пар полюсов [18; 26]. Поэтому механическая характеристика СД *в рабочем диапазоне* имеет вид горизонтальной прямой линии (рис. 35), т.е. СД имеет абсолютно жесткую механическую характеристику. Если момент нагрузки превышает значение $M_{\max}$, то двигатель выпадает из синхронизма.

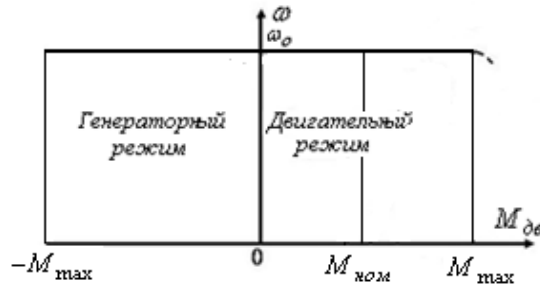


Рис. 35. Механическая характеристика СД

3.1. Конструкция и принцип действия

Статор СД выполняется из шихтованной электротехнической стали с тремя обмотками, сдвинутыми на 120° (как правило, соединенными в «звезду»), аналогично статору АД [8]. К обмоткам статора подключается трехфазное синусоидальное напряжение от сети или от преобразователя частоты.

Магнитный поток ротора создается либо с помощью обмотки возбуждения (рис. 36а, б), либо с помощью постоянных магнитов (рис. 36в), что используется в маломощных двигателях специального назначения [8]. Роторы с обмоткой возбуждения имеют дополнительную короткозамкнутую пусковую обмотку в виде беличьей клетки. Её наличие объясняется тем, что при подключении обмотки статора СД к трехфазному напряжению не создается пускового момента, т.к. из-за своей инерционности ротор двигателя не может мгновенно достичь синхронной скорости вращения. Назначение пусковой обмотки – разогнать ротор СД до скорости, близкой к синхронной ($\omega = 0,95\omega_0$). При достижении указанной скорости двигатель втягивается в синхронизм за счет магнитного поля, создаваемого обмотками статора и возбуждения.

На принципиальных схемах пусковая обмотка изображается сплошной внутренней окружностью (рис. 36а, б). По конструктивному исполнению роторов с обмоткой возбуждения различают два типа СД:

- двигатели с явно выраженными полюсами и обмотками возбуждения, состоящими из катушек, насаженных на полюсы (рис. 36а);
- двигатели с неявно выраженными полюсами в виде цилиндра (турбодвигатели), с массивными роторами и выфрезерованными в них пазами для укладки обмоток возбуждения (рис. 36б).

В качестве источника питания U_B для обмотки возбуждения чаще всего используется *генератор постоянного тока* небольшой мощности (от 0,3% до 3% от номинальной мощности СД), который устанавливается на одном валу с двигателем. Ток возбуждения I_B поступает в обмотку возбуждения через контактные кольца, установленные на валу ротора, и регулируется либо с помощью резистора R_B , либо с помощью управляемого выпрямителя.

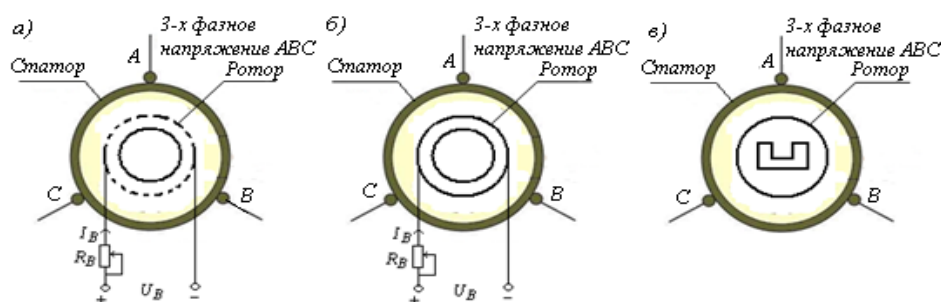


Рис. 36. Условное обозначение синхронных трехфазных двигателей:

a – ротор с явнополюсной обмоткой; *б* – ротор с неявнополюсной обмоткой; *в* – возбуждение от постоянных магнитов

Для определения максимального момента нагрузки $M_{\max}$, до которого сохраняется синхронная работа СД с питающим обмотку статора напряжением, служит угловая характеристика СД (рис. 37). Она отражает зависимость момента (M) двигателя от угла сдвига (θ) между осью магнитного поля СД и осью его полюсов. Этот угол характеризует степень растянутости «магнитной пружины» [15; 26]. Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла θ :

$$M = 3U_{\phi} E \sin \theta / (\omega_0 x_1) = M_{\max} \sin \theta,$$

где U_{ϕ} – фазное значение напряжения сети; E – ЭДС в обмотке СД статора; x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки статора.

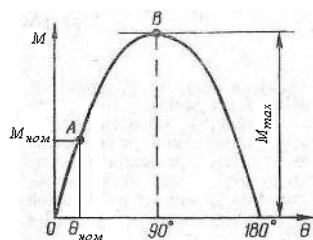


Рис. 37. Угловая характеристика СД

Перегрузочная способность СД ($M_{\max}$) зависит в меньшей степени от напряжения питающей сети по сравнению с АД, у которых эта зависимость квадратичная ($M_{\max} = f(U_{\phi}^2)$). Перегрузочную способность СД можно регулировать величиной тока I_B обмотки возбуждения.

Максимального значения момент СД достигает при $\theta = \pi/2$. При значениях $\theta > \pi/2$ двигатель выпадает из синхронизма, при небольших углах его работа устойчива. Номинальные значения угла $\theta_{\text{ном}}$ составляют обычно $(25 \div 30)^\circ$, им соответствует номинальный момент $M_{\text{ном}}$. Кратность максимального момента в этом случае $\lambda_M = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2 \div 2,5$.

3.2. Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности

СД обладают энергосберегающей способностью на участке электрической сети, в которой они работают [18; 26]. Этот эффект иллюстрируют U -образные характеристики на рис. 38*a*, где пунктирной линией обозначены значения токов возбуждения I_{B1} , соответствующие работе СД с $\cos \phi_1 = 1$ (при наименьшем потребляемом токе) при разных значениях мощности двигателя.

При малых значениях тока возбуждения I_B (рис. 38*б*) ток I_1 в обмотке статора отстает по фазе от напряжения сети U_1 , угол $\phi_1 < 0$ (реактивная составляющая тока I_{1p} носит индуктивный характер). При увеличении тока I_B величина I_{1p} будет уменьшаться, а активная составляющая I_{1a} будет увеличиваться, что при постоянной величине тока I_1 приведет к уменьшению угла ϕ_1 . При увеличе-

нии тока возбуждения до значения $I_b = I_{b1}$ ток статора I_1 станет чисто активным ($\varphi_1 = 0$), а коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_1 = 1$. Если продолжить увеличения тока возбуждения $I_b > I_{b1}$, т.е. перевозбуждать двигатель, то реактивная составляющая тока I_{1p} появится вновь, но она будет опережать по фазе напряжение сети ($\varphi_1 > 0$), т.е. она будет емкостной. Ток I_1 , потребляемый двигателем от сети, начнет возрастать снова (рис. 38а).

Это свойство используется при создании синхронных компенсаторов (СК), которые представляют собой перевозбужденные СД, работающие без нагрузки на валу (на холостом ходу). Эти компенсаторы применяются для уменьшения потерь мощности в сетях с большим количеством трансформаторов и АД, которые создают значительную индуктивную составляющую I_{1p} ($\varphi_{1\text{АД}} < 0$). Синхронный компенсатор создает ток со значительной емкостной составляющей ($\varphi_{1\text{СД}} > 0$). В результате суммарный сдвиг по фазе $\varphi_1 = \varphi_{1\text{АД}} + \varphi_{1\text{СД}}$ намного уменьшится, потребляемый ток I_1 уменьшится, а коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ возрастет (рис. 38а). Потери в сети, величина которых пропорциональна квадрату тока I_1 , уменьшатся.

Процесс регулирования тока в обмотке возбуждения СД или СК автоматизируют с помощью системы автоматического регулирования возбуждения АРВ [26]. Основным элементом АРВ является управляемый тиристорный выпрямитель.

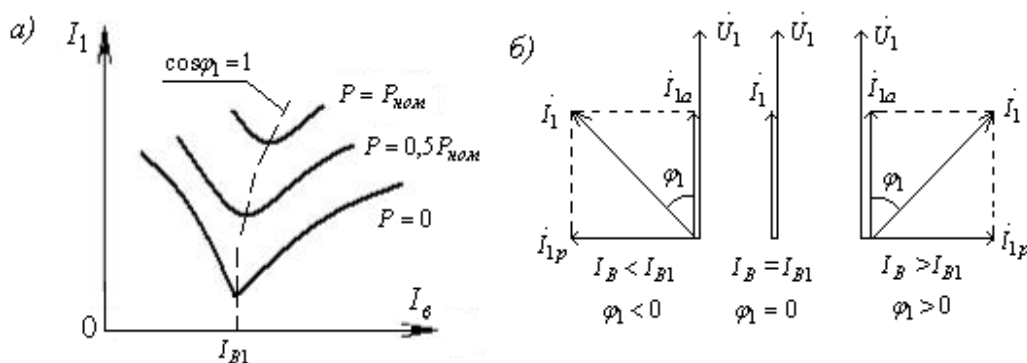


Рис. 38. Повышение коэффициента мощности сети посредством СД

3.3. Управление синхронным двигателем

Под управлением СД будем понимать обеспечение пуска и синхронизации вращения ротора двигателя с сетью, регулирование скорости и торможение.

3.3.1. Асинхронный пуск

В большинстве случаев СД мощностью до нескольких сотен киловатт пускают прямым включением в сеть. Кратность пускового тока при прямом пуске $k_i = I_n / I_{ном} = 4 \div 5$ [15; 26].

Рассмотрим асинхронный пуск СД, который осуществляется при наличии на роторе пусковой обмотки типа «беличья клетка». Как правило, в начале асинхронного пуска СД (рис. 39а) переключатель К находится в положении 1, обмотка возбуждения замкнута на резистор R. Это делается для ограничения ЭДС, которая наводится в обмотке возбуждения вращающимся полем статора. Вращающееся поле статора наводит в пусковой обмотке токи, которые создают магнитное поле ротора. Его взаимодействие с полем статора создает на валу ротора вращающий момент, т.е. при пуске СД работает как асинхронный (характеристика 2 на рис. 39б). При достижении синхронной скорости $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ переключатель К переводится в положение 2 и в обмотку возбуждения подается постоянный ток I_b (точка А на рис. 39б). При возбуждении СД (подключении обмотки возбуждения) между полюсами ротора и полем статора устанавливается устойчивая магнитная связь и двигатель втягивается в синхронизм. Его ротор начинает вращаться с частотой $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$, т.е. синхронно с вращающимся полем.

Пусковая обмотка обеспечивает вид характеристики 2 на рис. 39б. Пусковая обмотка 1 по сравнению с обмоткой 2 может иметь больший входной момент $M_{b1} > M_{b2}$, но меньший пусковой

$M_{\Pi 1} < M_{\Pi 2}$. Для втягивания в синхронизм должно соблюдаться условие $M_B \geq M_C$, где M_C – приведенный к валу СД момент сопротивления. Для асинхронного пуска двигателя должно соблюдаться условие $M_{\Pi} \geq M_C$. Выбор вида пусковой механической характеристики 2 определяется конкретными условиями работы СД.

Иногда при относительно небольших моментах нагрузки $M_C < 0.4 M_{\text{ном}}$ и малых приведенных к валу двигателя моментах инерции схему асинхронного пуска упрощают, исключая из нее переключатель К и резистор R, а обмотку возбуждения постоянно подключая к источнику U_B . Однако в этом случае при разгоне двигателя пусковой момент СД оказывается ниже из-за воздействия на магнитное поле статора магнитного поля обмотки возбуждения. По этой же причине СД с возбуждением от постоянных магнитов используются только в электроприводах малой мощности.

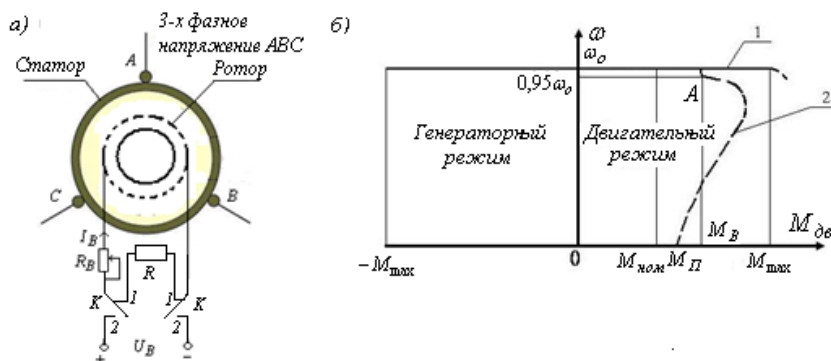


Рис. 39. Схема асинхронного пуска СД (а), механические характеристики СД (б); 1 – механическая характеристика СД в установившемся режиме; 2 – механическая характеристика СД при асинхронном пуске

При пуске СД мощностью несколько мегаватт возникает необходимость ограничения пусковых токов. Находят применение три способа токоограничения при асинхронном пуске:

- введение *на время пуска* добавочных реактивных сопротивлений $X_{\text{доб}}$ (реакторов L) в цепи обмоток статора;
- введение *на время пуска* добавочных активных сопротивлений $R_{\text{доб}}$ в цепи обмоток статора;
- кратковременное уменьшение *на время пуска* фазного напряжения обмоток статора.

3.3.2. «Частотный» пуск

С появлением на рынке преобразователей частоты широкое применение получил «частотный» пуск СД. При управлении СД от ПЧ может быть реализован такой темп изменения частоты питающего напряжения (скорости вращения магнитного поля), при котором ротор «успевает» за полем и двигатель работает синхронно с источником питания уже с самых малых скоростей. Но такой пуск имеет свои особенности [18]. При использовании СД в приводах с большим моментом инерции рабочей машины изменять частоту напряжения следует плавно, учитывая большой запас кинетической энергии вращающихся масс. Иначе возможно «выпадение» двигателя из синхронизма, т.е. остановка или продолжение вращения ротора с асинхронной скоростью. Начальная частота напряжения в цепи статора для СД при пуске должна составлять доли герца, а затем следует медленно повышать частоту напряжения до требуемой величины.

Поскольку при «частотном» пуске скольжение s имеет небольшую величину ($s \ll 1$), потери мощности в двигателе меньше, чем при асинхронном пуске, поэтому с энергетической точки зрения «частотный» пуск является более предпочтительным, чем асинхронный.

3.3.3. Регулирование скорости

До недавнего времени СД применялись исключительно в нерегулируемом электроприводе, как правило, для обеспечения заданной (постоянной) скорости вращения рабочей машины [15]. В связи с созданием электронных ПЧ появилась возможность регулирования скорости вращения ротора СД. Частотное регулирование является практически единственным способом регулирования угловой ско-

рости СД [8]. При вхождении СД в синхронизм его скорость при изменении нагрузки на валу до максимального значения $M_{\max}$ остается постоянной и равной синхронной скорости $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ (рис. 39б). Как и у АД с кз ротором это регулирование плавное, двухзонное. Диапазон регулирования вверх от номинальной синхронной скорости ограничивается качеством подшипников, балансировкой и механической прочностью ротора. Диапазон регулирования вниз от номинальной скорости $D \geq 100$ и более при абсолютной жесткости механических характеристик двигателя. Допустимая нагрузка при постоянном возбуждении и независимой вентиляции соответствует номинальному моменту $M_{\text{ном}}$.

При частотном регулировании скорости СД обладает тремя каналами управления моментом $M_{\text{дв}}$ [8]:

- изменением тока возбуждения I_b ;
- изменением частоты напряжения обмоток статора f_1 ;
- изменением амплитуды напряжения обмоток статора U_1 .

Применяются следующие законы регулирования скорости СД:

1. Регулирование скорости при независимой от угловой скорости механической характеристике производственного механизма, т.е. при $M_c = \text{const}$. В этом случае ток возбуждения имеет постоянную величину и равен номинальному $I_b = I_{\text{вном}} = \text{const}$; частота напряжения обмоток статора регулируется ($f_1 = \text{var}$); амплитуда напряжения обмоток статора регулируется ($U_1 = \text{var}$) при условии сохранения постоянства отношения $U_1 / f_1 = \text{const}$. Регулирование скорости осуществляется вниз от номинальной (рис. 40а), величина максимального момента сохраняется постоянной во всем диапазоне регулирования скорости.
2. Регулирование скорости при постоянной мощности $P_c = \text{const}$ (рис. 40б):
 - для скоростей, больших номинальной $\omega > \omega_0$, должны выполняться условия: $I_b = I_{\text{вном}} = \text{const}$, $U_1 = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $f_1 = \text{var}$ $f_1 > f_{\text{ном}}$.
 - для скоростей, меньших или равных номинальной $\omega \leq \omega_0$, должны выполняться условия: $I_b = I_{\text{вном}} = \text{const}$, $f_1 = \text{var}$ $U_1 = \text{var}$ при условии сохранения постоянства отношения $U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}$. При малых угловых скоростях СД обладает значительным максимальным моментом (рис. 40б), например, $M_{\max 4}$. Однако увеличение максимального момента сопровождается увеличением тока статора из-за уменьшения реактивных сопротивлений при снижении частоты.
3. Регулирование скорости при вентиляторной нагрузке $M_c = M_0 + k \cdot \omega^2$ производится при выполнении условий: $I_b = I_{\text{вном}} = \text{const}$, $f_1 = \text{var}$, $U_1 = \text{var}$ при условии сохранения постоянства отношения $U_1 / f_1^2 = \text{const}$. Величина максимального момента снижается при уменьшении частоты ($M_{\max 1} < M_{\max 2} < M_{\max 3}$ на рис. 40в).

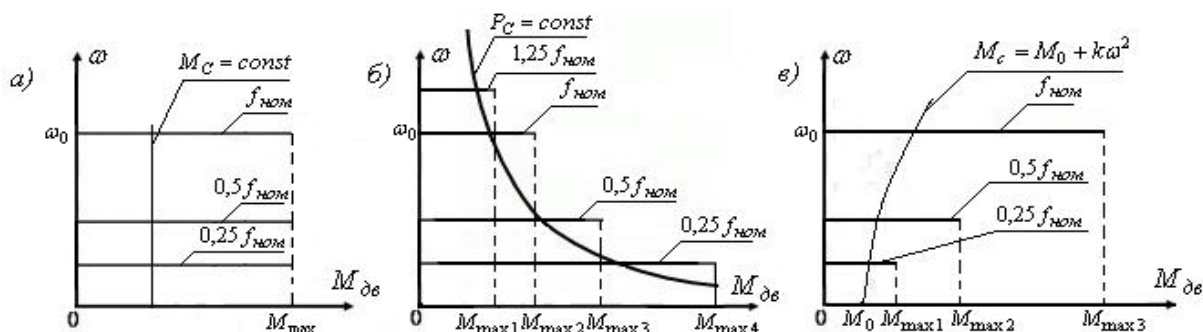


Рис. 40. Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов с частотным управлением

Отметим важное свойство СД – создание тормозного момента при неподвижном роторе, обеспечивающего фиксацию ротора в заданном положении при подаче на статорную обмотку постоянного напряжения ($f_1 = 0$).

Синхронные двигатели имеют постоянную рабочую скорость, которая не меняется во время стандартных изменений нагрузки. Они работают со скольжением 0%. СД при асинхронной работе (при быстром пуске или выходе из синхронизма) выдают многократный номинальный ток.

ПЧ должен выбираться по току в синхронных двигателях и соответственно завышенного габарита [5].

3.3.4. Динамическое торможение

Торможение СД осуществляется в генераторном режиме. Торможение противовключением используется редко, т.к. перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления [26].

Наиболее часто используется схема динамического торможения СД, реализуемая в генераторном режиме при работе независимо от сети переменного тока [33]. При динамическом торможении обмотку статора отключают от сети и замыкают на резисторы R_T (рис. 41а). Обмотка возбуждения ротора остаётся подключенной к источнику постоянного напряжения.

Вращающийся по инерции ротор своим магнитным потоком индуцирует в обмотке статора ЭДС. В замкнутой обмотке статора появляются токи (магнитное поле), величина которых ограничивается сопротивлением резисторов R_T . Величина тока возбуждения I_B регулируется переменным сопротивлением R_B или управляемым выпрямителем.

При этом взаимодействие магнитного поля статора с токами во вращающемся роторе создаёт момент в соответствии с правилом Ленца, направленный противоположно направлению вращающегося вала, т.е. тормозной. На роторе возникает тормозящий электромагнитный момент, способствующий быстрой остановке двигателя.

Механические характеристики СД при динамическом торможении аналогичны механическим характеристикам АД и представлены на рис. 41б. Пусть текущий режим работы СД соответствует точке a на механической характеристике. При динамическом торможении рабочая точка перемещается в положение b или b_1 в зависимости от величин сопротивлений R_T (при $R_{T2} < R_{T1}$ торможение будет более интенсивным).

Время торможения при питании ОВ от собственного возбудителя, находящегося на валу СД, больше, чем при питании от автономного источника $U_{ОВ}$. Это объясняется тем, что при уменьшении скорости СД уменьшается ток в ОВ, а следовательно, и тормозящий момент.

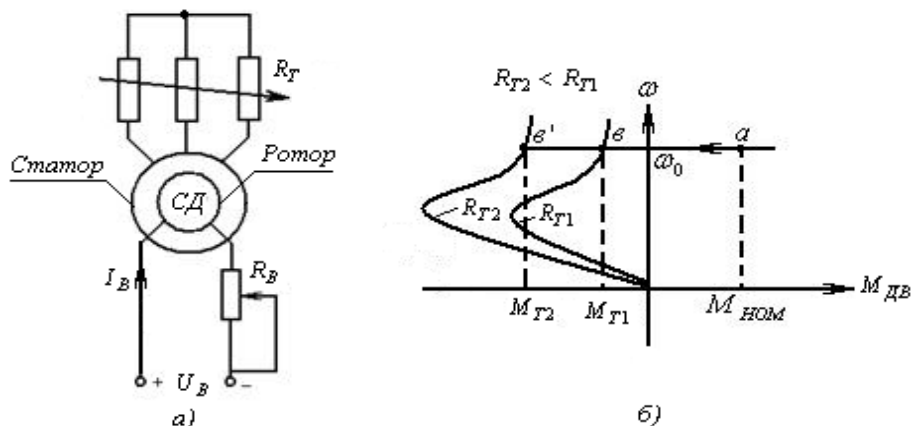


Рис. 41. Динамическое торможение СД:

a – схема динамического торможения; b – механические характеристики

3.3.5. Особенности переходных процессов электропривода с синхронным двигателем

Переходные процессы в синхронном электроприводе отличаются большим разнообразием и сложностью [26]. Определяется это тем, что СД имеет несколько обмоток (статора, возбуждения и пусковую), обтекаемых переменным и постоянным токами, которые магнитно связаны друг с другом и в процессе работы двигателя непрерывно меняют расположение относительно друг друга. Во многих случаях необходимо учитывать и взаимодействие СД и питающей сети.

Аналитическими методами анализируются лишь простейшие переходные процессы при принятии ряда допущений [26].

В общем случае переходные процессы в синхронном электроприводе являются электромеханическими, т.е. процессы в электрической и механической частях ЭП связаны друг с другом и имеют, как правило, колебательный характер.

Как правило, для экспериментальной настройки и анализа качества управления в сервоприводах с синхронными двигателями предусматриваются специальные режимы, например тестовый режим с использованием графического интерфейса [16].

3.4. Техничко-экономические показатели СД

Синхронные двигатели находят все более широкое применение в промышленности благодаря их высоким технико-экономическим показателям [8; 26]:

- 1) высокий КПД современных СД, составляющий 96–98%, это на 1–2% выше КПД асинхронных двигателей той же мощности;
- 2) возможность улучшать режим работы и экономичность сети предприятия за счет реализации режима работы СД с опережающим $\cos \varphi$;
- 3) абсолютно жесткая механическая характеристика;
- 4) возможность регулирования перегрузочной способности СД (момента $M_{\max}$) за счет изменения тока возбуждения I_B ;
- 5) меньшая зависимость $M_{\max}$ от напряжения сети по сравнению с АД, у которых эта зависимость квадратичная;
- 6) большой воздушный зазор между ротором и статором, вследствие чего двигатели легко охлаждаются внешним вентилятором;
- 7) возможность изготовления СД на очень большие мощности (до нескольких десятков мегаватт и более).

Синхронные машины – наиболее перспективные электромеханические преобразователи энергии, их совершенствование в ближайшее время приведет к очередному скачку в развитии АЭП [8].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение трехфазного синхронного двигателя.
2. Какова жесткость механической характеристики СД в рабочем диапазоне?
3. Что такое угловая характеристика СД?
4. В чем заключается энергосберегающая способность СД?
5. Поясните схему асинхронного пуска СД.
6. Каким образом реализуется «частотный» пуск СД?
7. Какой способ регулирования скорости СД используется на практике?
8. Назовите 3 канала регулирования момента СД при частотном управлении.
9. Поясните с приведением механических характеристик законы регулирования скорости СД при постоянном моменте нагрузки, при постоянной мощности, при вентиляторной нагрузке.
10. Какой вид торможения СД наиболее часто используется на практике?
11. Поясните работу схемы динамического торможения СД и соответствующие механические характеристики двигателя.

3.5. Вентильные электродвигатели

Вентильным электродвигателем (ВД) называется устройство, состоящее из трехфазного синхронного двигателя (СД), управляемого полупроводниковым преобразователем частоты (ПЧ) в функции положения ротора двигателя. Разработка ВД вызвана стремлением устранить механический выпрямитель (коллекторно-щеточный узел) и сохранить высокие регулировочные качества двигателя постоянного тока (ДПТ) [26].

Отличительной особенностью ВД является его самосинхронизация с помощью датчика положения ротора (ДПР), который определяет последовательность и частоту переключения полупроводниковых элементов инвертора ПЧ в зависимости от углового положения ротора относительно статора двигателя [18]. ДПР генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи инвертора, подключающего к сети соответствующие фазные обмотки статора. В результате магнитное поле статора вращается с той же средней скоростью, что и ротор. Процесс переключения

тока в трехфазной обмотке статора ВД происходит аналогично процессу коммутации в коллекторно-щеточном узле двигателя постоянного тока. Механические характеристики ВД мало отличаются от механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Рассмотрим функциональную схему ВД (рис. 42), состоящего из синхронного двигателя (СД) с электромагнитным возбуждением, создаваемым током I_B от источника питания U_B , датчика положения ротора (ДПР), преобразователя частоты (ПЧ), включающего управляемый выпрямитель (УВ), инвертор (ИНВ), сглаживающий реактор L_Φ , блоки управления преобразователем (БУП), выпрямителем (БУВ), инвертором (БУИ).

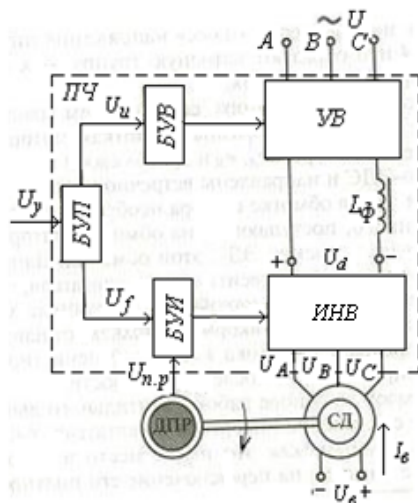


Рис. 42. Функциональная схема вентильного двигателя

В ВД мощностью до 30 кВт основной магнитный поток возбуждения обычно создается постоянными магнитами, изготовленными из магнитотвердых материалов с большой коэрцитивной силой. Такая конструкция позволяет исключить источник питания U_B и скользящие контакты в цепи тока возбуждения I_B , что позволяет использовать такие ВД (при определенной конструктивной доработке) на взрывоопасных объектах.

В автоматизированном электроприводе сигнал U_y управления частотой вращения вала двигателя СД подается на вход блока управления частотным преобразователем БУП.

На выходе БУП формируются сигналы U_u и U_f соответственно для управления амплитудой напряжения питания U_d инвертора ИНВ и частотой f его выходного трехфазного напряжения. Сигналы $U_{n.p.}$ от ДПР подаются в блок управления инвертором и корректируют сигнал управления частотой U_f в соответствии с угловым положением ротора.

Датчик положения ротора ДПР реализует обратную связь по положению ротора. Его работа может быть основана на разных принципах – фотоэлектрическом, индуктивном, трансформаторном, на эффекте Холла и прочее. Наибольшую популярность приобрели датчики Холла и фотоэлектрические датчики, обладающие низкой инерционностью и обеспечивающие малые запаздывания в канале обратной связи по положению ротора [18].

Обычно фотоэлектрический датчик содержит три неподвижных фотоприёмника, между которыми находится вращающаяся маска с рисками, жёстко закреплённая на валу ротора ВД. Таким образом, ДПР обеспечивает информацию о текущем положении ротора ВД для системы управления.

Магниточувствительные микросхемы, содержащие датчики ЭДС Холла, располагаются на статоре двигателя. Эти микросхемы обеспечивают получение дискретных сигналов уровня логических «1» и «0» соответственно при попадании или не попадании микросхемы в зону действия магнитного поля вращающегося ротора.

Коммутация тока в вентильных АИ может быть естественной и искусственной [25].

Естественная коммутация вентилей инвертора осуществляется за счет противо-ЭДС e_A, e_B, e_C , наводимых в фазных обмотках статора вращающимся магнитным полем ротора. В определенные моменты времени мгновенные линейные значения противо-ЭДС обмотки статора превышают переменное напряжение питания U_A, U_B, U_C , поступающее на обмотку статора с выхода инвертора, что ведет к прекращению тока в анодной цепи тиристоров инвертора и их закрытию в определенной последо-

вательности чередования фаз [18]. Однако естественная коммутация вентилей осуществляется только при сравнительно большой противо-ЭДС, соответствующей скорости вращения ротора СД примерно не ниже 10% от номинальной [26]. Поэтому пуск ВД, когда противо-ЭДС отсутствует или очень мала, при таком способе коммутации вентилей требует специальных мер для устранения этого недостатка. К ним относятся: асинхронный пуск СД, имеющего пусковую обмотку; переключение инвертора в режим искусственной коммутации; импульсный метод, использующий специальную систему управления УВ.

Инвертор с искусственной коммутацией вентилей – это преобразователь постоянного напряжения или тока в трехфазные переменные с принудительной коммутацией вентилей [26]. В этом случае работа инвертора практически не зависит от нагрузки и устраняются трудности при пуске ВД, характерные для инверторов с естественной коммутацией.

Схема ВД с искусственной коммутацией вентилей инвертора приведена на рис. 43. Схема содержит инвертор (И), выполненный на тиристорах $VS1 - VS6$, и схему управления им (СУИ); управляемый выпрямитель (УВ) и схему управления им (СУВ); датчик положения ротора (ДПР); трехфазный синхронный двигатель (М); коммутирующие тиристоры $VS7, VS8$; обратный мост на диодах $VD1' - VD6'$; разрядные резисторы $R1, R2$ и диоды $VD7', VD8'$; силовой фильтр $L1, C1$; устройства коммутации $L2-L5, C2, C3$.

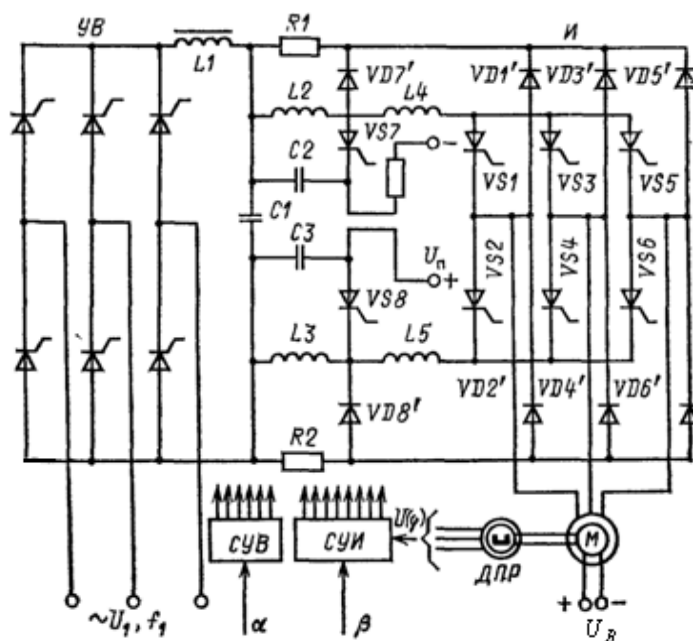


Рис. 43. Схема ВД с искусственной коммутацией вентилей инвертора

Искусственная коммутация осуществляется за счет энергии, запасенной в конденсаторах $C2$ и $C3$ от дополнительного источника подзаряда $U_{\text{п}}$. Инвертор имеет групповую коммутацию тиристоров. Коммутация тиристоров анодной группы $VS1, VS3, VS5$ осуществляется элементами $C2, L2, L4, VS7$, а тиристоров катодной группы $VS2, VS4, VS6$ – элементами $C3, L3, L5, VS8$. Например, при включении тиристора $VS7$ и разряда конденсатора $C2$ (спадания тока через него до нуля) тиристоры анодной группы $VS1, VS3, VS5$ закрываются. Но продолжается колебательный перезаряд конденсатора $C2$ через реактор $L2$, обеспечивая обратное (запирающее) напряжение на тиристорах $VS1, VS3, VS5$ в течение времени, необходимого для восстановления их запирающих свойств. После перезаряда конденсатора $C2$ и закрывания тиристора $VS7$ энергия, накопленная в реакторе $L2$, гасится в резисторе $R1$. Во внекоммутационный период конденсатор $C2$ вновь перезаряжается от источника $U_{\text{п}}$.

Управление инвертором производится в функции положения ротора двигателя М, контролируемого датчиком положения, который воздействует на СУИ. Регулирование скорости двигателя в этой схеме возможно изменением выпрямленного напряжения (изменением угла α открытия тиристорov УВ), угла управления β тиристорами инвертора и тока возбуждения (изменением величины $U_{\text{в}}$).

Из приведенного примера следует, что применение искусственной коммутации приводит к более сложным схемам управления.

Использование ВД в автоматизированном электроприводе позволяет сочетать надежность двигателя переменного тока с высокими регулировочными качествами двигателя постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. Какой синхронный двигатель называется вентильным? Чем обусловлено его широкое применение?
2. Каково назначение датчика положения ротора (ДПР) в конструкции ВД?
3. Какие принципы работы ДПР получили наибольшее распространение на практике?
4. За счет чего осуществляется естественная коммутация вентилей в инверторе и в чем ее главный недостаток?
5. В чем заключается основное преимущество инвертора с искусственной коммутацией вентилей перед инвертором с естественной коммутацией?

3.6. Вентильно-индукторный привод

В 90-е годы XX века интенсивное развитие получил **вентильно-индукторный привод (ВИП)**, обязанный своим появлением успехам электронной техники [15]. Силовым элементом ВИП является индукторный двигатель (ИД), действие которого основано на притяжении ферромагнитного тела к возбужденному электромагниту (индуктору) [18]. ИД имеет исполнение с активным (возбужденным) ротором или с реактивным (невозбужденным) ротором. Иногда ИД называют синхронными редукторными двигателями, т.к. они позволяют получить низкие частоты вращения ротора при значительных частотах магнитного поля статора. Например, при частоте переменного тока 50 Гц возможно получение частоты вращения ротора в несколько десятков оборотов в минуту.

Вращающий момент на роторе двигателя возникает за счет сил магнитного притяжения зубцов ротора к зубцам статора. Ротор в любой момент времени стремится занять такое положение относительно статора, при котором замыкающийся через ротор магнитный поток вращающегося поля статора испытывает наименьшее магнитное сопротивление.

ИД состоит из n -полюсного статора, несущего катушки, и m -полюсного пассивного ротора, причем $n \neq m$ [15].

Электронный коммутатор (К) (рис. 44) подключает по сигналу датчика положения ротора (ДПР) катушки определенной фазы обмотки статора к источнику питания – выпрямителю (В) или батарее. Конденсатор (С) используется в качестве фильтра на выходе выпрямителя.

При возбужденной фазе $A - a$ (включенных транзисторах $VT1, VT2$) полюса ротора $\alpha - \alpha$ притянуты к соответствующим полюсам статора. При выключении $VT1, VT2$ и включении $VT3, VT4$, т.е. возбуждении фазы $B - b$ (при перемещении поля *по часовой стрелке*) ближайшие полюса ротора $\beta - \beta$ притянутся к вновь возбужденной фазе и *ротор повернется на некоторый угол против часовой стрелки*. Повторение переключений приведет к непрерывному вращению ротора со скоростью, определяемой частотой переключений. Увеличивая число зубцов сердечников статора и ротора, можно получить ИД на весьма малую частоту вращения.

Диоды $VD1 - VD6$ обеспечивают циркуляцию электромагнитной мощности в электроприводе при отключении силовых транзисторов.

На вращающий момент, соответствующий каждой скорости, будут влиять как ток, протекающий по обмотке включенной фазы, так и углы включения и отключения фазы.

Из изложенного следует, что удовлетворительная работа ВИП возможна лишь при весьма тонком управлении, осуществляемом специализированной схемой управления [15].

Основное достоинство ИД – возможность получения весьма низких частот вращения, что упрощает электропривод за счет отказа от использования механического редуктора при передаче движения от двигателя на исполнительный орган рабочей машины.

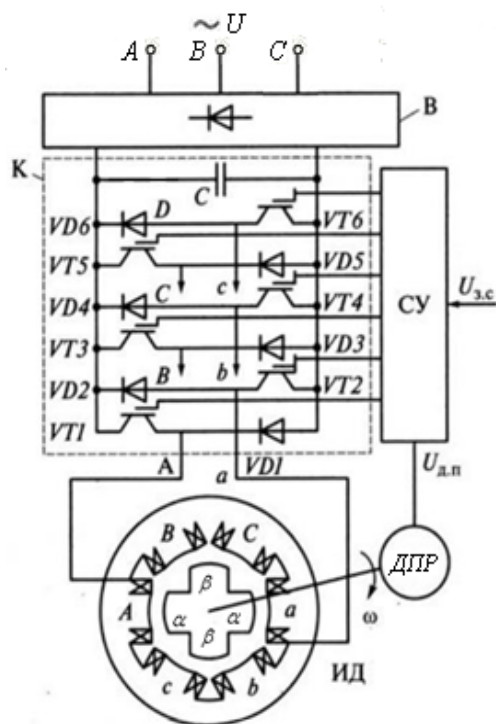


Рис. 44. Схема вентильно-индукторного электропривода

Контрольные вопросы

1. Почему индукторный двигатель ИД называют синхронным редукторным двигателем?
2. За счет чего обеспечивается малая скорость вращения ИД?
3. Каково назначение электронного коммутатора К?
4. Какие факторы влияют на вращающий момент ИД?

3.7. Шаговый двигатель

Шаговый двигатель (ШД) – это бесколлекторный синхронный двигатель, ротор которого совершает дискретные перемещения (шаги) определенной величины с фиксацией положения ротора в конце каждого шага [26; 36]. Перемещение ротора происходит шагами известной величины. Подсчитав шаги, можно определить, насколько изменилось положение ротора, вычислить его абсолютную позицию. Таким образом, на базе ШД, объединяющего в себе двигатель и позиционирующее устройство, можно создавать электроприводы более простой конструкции (*без обратной связи*).

3.7.1. Принцип работы шаговых двигателей и схемы коммутации обмоток

Пусть мы имеем замкнутый магнитопровод с четырьмя обмотками – статор (рис. 45) [36]. На валу двигателя жестко закреплен двухполюсный постоянный магнит – это ротор. На статоре имеются 2 пары явно выраженных полюсов, на которых находятся 2 обмотки управления (возбуждения) *AB* и *CD*. Подключим к источнику напряжения обмотку *AB* (полярность + –), как показано на рис. 45а. Ток в этой обмотке вызовет появление магнитного поля статора с полюсами сверху *N*, снизу *S*.

Как известно, разноименные полюса магнитов притягиваются. В результате ротор (постоянный магнит) займет положение, в котором оси магнитных полей ротора и работающих полюсов статора совпадают. Механическое положение будет устойчивым, поскольку при отклонении от него на ротор будет действовать вращающий момент, который стремится вернуть ротор в положение равновесия. Величина этого момента определяется по формуле

$$M = M_{\max} \sin \alpha,$$

где $M_{\max}$ – максимальный момент двигателя; α – угол между осями магнитных полей статора и ротора.

Теперь снимем напряжение с обмотки *AB* и подадим на обмотку *CD* (полярность + –) (рис. 45б). Ток в обмотке *CD* создаст магнитное поле с горизонтальными полюсами, слева *S*, справа *N*. Магнит-

ное поле делает все, чтобы магнитный поток замкнулся по минимальному пути. Ротор повернется в положение, указанное на рис. 45б. Механическое положение ротора опять устойчивое. Это был первый шаг двигателя. В нашем случае он равен одной четвертой оборота.

Отключаем обмотку *CD* и подаем напряжение опять на обмотку *AB*, но уже в другой полярности ($- +$ на рис. 45в). Опять магнитное поле статора повернется на 90° , а за ним и ротор.

Еще одна коммутация *AB* – отключаем, *CD* – подключаем (полярность $- +$) и ротор совершает еще один шаг на одну четвертую окружности (рис. 45г).

Следующая коммутация вернет ротор в исходное положение. Мы сделали поворот за 4 шага. Если продолжить переключение фаз, ротор будет вращаться с частотой, пропорциональной частоте переключения. Если коммутировать фазы в противоположной последовательности, ротор будет вращаться в обратном направлении. Если прекратить коммутацию, ротор остановится.

На рис. 45 представлен биполярный двигатель, который имеет по одной обмотке для каждой фазы (обмотки *AB* и *CD*). В таком двигателе изменение магнитного поля обеспечивается сложной коммутацией обмотк. Для каждой обмотки должны выполняться следующие операции:

- подключение к источнику напряжения в прямой полярности;
- отключение от источника напряжения;
- подключение к источнику напряжения с противоположной полярностью.

Для такой коммутации требуется сложный мостовой драйвер, например микросхема *L298N*, обеспечивающая ток коммутации до 2 А. Если нужны большие токи, то задача управления биполярным двигателем еще усложняется.

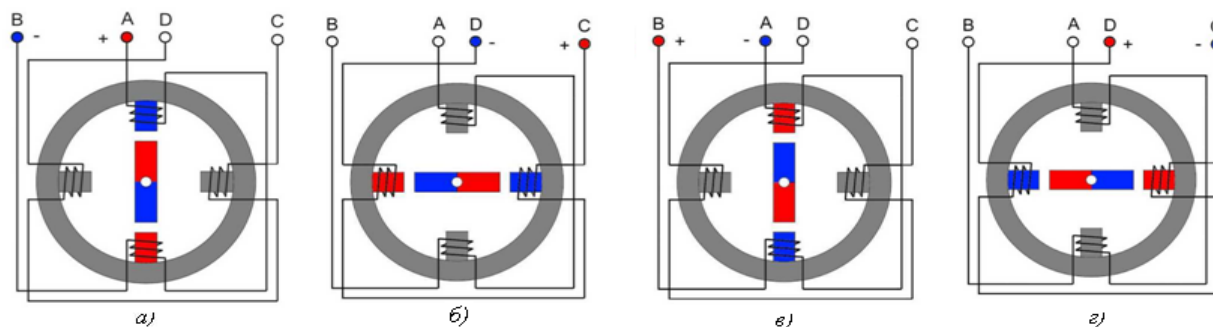


Рис. 45. Принцип работы шагового двигателя

Существует другой способ изменения магнитного поля в статоре с гораздо более простой схемой коммутации. Это применение двигателя с униполярными обмотками (рис. 46).

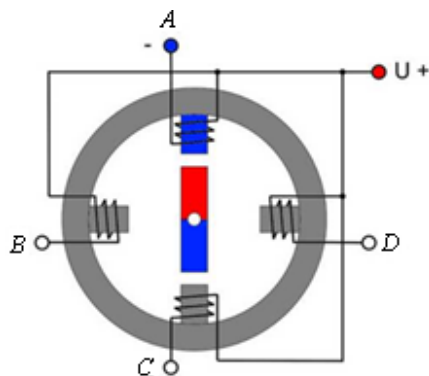


Рис. 46. Схема включения униполярных обмоток

У всех четырех обмоток один вывод подключен к плюсовому выводу источника питания. Другие выводы *A*, *B*, *C*, *D* последовательно коммутируются к минусовому выводу. Соответствующие обмотки создают магнитное поле, и ротор поворачивается вслед за ним.

Для коммутации обмоток таким способом достаточно четырех ключей, замыкающих обмотки к минусовому выводу источника напряжения. Ключи часто управляются непосредственно с выводов микроконтроллеров.

Поскольку в униполярном двигателе работает только одна обмотка вместо двух, биполярный двигатель при тех же размерах обеспечивает больший вращающий момент по сравнению с униполяр-

ным. Выигрыш в моменте у биполярного ШД составляет около 40%. Однако если нет необходимости использовать ШД на полную мощность, униполярным двигателем гораздо проще управлять

Схема коммутации, при которой поочередно подключается одна обмотка (см. рис. 45), называется симметричной (рис. 47а).

Управление, при котором подключаются по очереди одна или две обмотки, называется несимметричным. Пусть исходное состояние соответствует рис. 45а. Схема коммутации обмоток представлена на рис. 47б. Не отключая обмотку AB , подключим обмотку CD с полярностью на рис. 45б. Результирующее магнитное поле и ротор повернутся на угол 45° . Затем отключим обмотку AB , не отключая обмотку CD – угол поворота 90° . Не отключая обмотку CD , подключим обмотку AB , но с противоположной полярностью – угол поворота 135° . Получаем шаг ротора 45° .

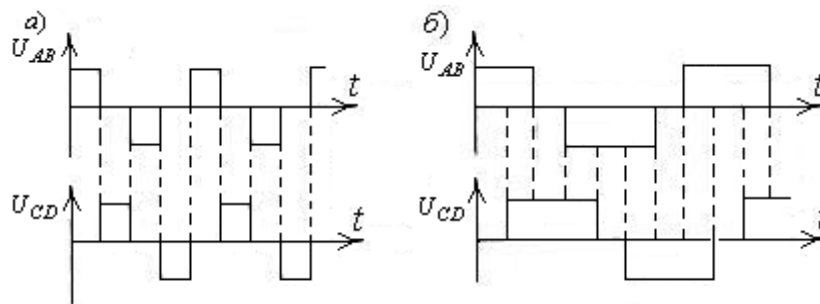


Рис. 47. Схема коммутации обмоток ШД:
а – схема симметричной коммутации; б – схема несимметричной коммутации

Шаг двигателя в общем случае определяется по формуле $\alpha = \frac{2\pi}{pn}$, где p – число пар полюсов; n – число фаз (обмоток управления) при симметричной коммутации и удвоенное число фаз при несимметричной. При симметричной коммутации $\alpha_{\text{сим}} = \frac{2\pi}{2 \times 2} = \frac{\pi}{2}$, при несимметричной коммутации $\alpha_{\text{несим}} = \frac{2\pi}{2 \times 2 \times 2} = \frac{\pi}{4}$. Этот режим называют полушаговым.

Для обоих режимов справедливо то, что при остановке двигателя со снятием напряжения со всех фаз ротор двигателя находится в свободном состоянии и может смещаться от механических воздействий. Чтобы зафиксировать положение ротора, необходимо формировать в обмотках двигателя ток удержания. Этот ток может быть значительно меньше номинального. Способность ШД фиксировать свое положение при остановке позволяет обходиться без механических фиксаторов, тормозных систем и т.п.

Для получения еще большего числа шагов двигателя применяют *микрошаговый* режим. Включают две обмотки как на полушаговом режиме, но токи обмоток распределяют неравномерно. Магнитное поле статора смещается между полюсов, смещается и положение ротора. Как правило, диспропорция токов между фазами происходит с определенной дискретностью, микрошагом. Современные системы управления обеспечивают перемещение ШД с дискретностью более 1000 микрошагов на оборот вала. Микрошаговый режим способен значительно повысить точность позиционирования ШД, хотя система управления приводом становится значительно сложнее.

ШД рассчитаны на принудительное вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение [26]. Процесс отработки шаговым двигателем трех импульсов показан на рис. 48. Переходный процесс каждого шага имеет колебательный характер. Это обусловлено механической инерцией ротора. Если частота $f = 1/\Delta t$ следования импульсов управления такова, что время переходного процесса $t_{\text{ин}} > \Delta t$, то ротор может не успеть отработать полностью все импульсы и возможен пропуск шагов.

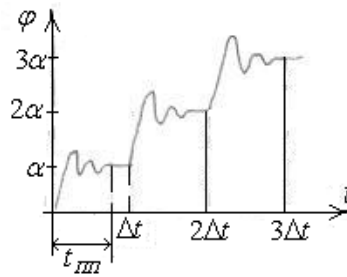


Рис. 48. Вид переходных процессов при обработке ШД управляющих импульсов

Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без выпадания из синхронизма (пропуска шагов), называется *частотой приемистости* $f_{\text{КПР}}$. Чем больше механическая инерция ротора и момент нагрузки на валу, тем меньше $f_{\text{КПР}}$.

В общем случае угловая скорость ШД определяется из выражения

$$\omega = \alpha \cdot f_K,$$

где f_K – частота коммутации обмоток.

Максимальная допустимая скорость ШД определяется моментом нагрузки на валу (значением частоты приемистости $f_{\text{КПР}}$):

$$\omega_{\text{max}} = \alpha \cdot f_{\text{КПР}}.$$

3.7.2. Конструкция шаговых двигателей

В зависимости от числа обмоток и полюсов на статоре современные ШД бывают однофазными, двухфазными и многофазными. По конструкции ротора они делятся на ШД с активным или пассивным ротором.

Активный ротор у ШД выполняется из постоянных магнитов или снабжается обмоткой возбуждения как у обычных СД. Вследствие высокой экономичности и надежности в работе широкое распространение получили двигатели с ротором из постоянных магнитов, называемые магнитоэлектрическими ШД. Они обычно имеют довольно крупный шаг в связи с трудностями изготовления активного ротора с малыми полюсными делениями. У реальных двигателей с постоянными магнитами число шагов на оборот достигает до 48, что соответствует углу шага 7.5° [36]. Для уменьшения шага в таких ШД увеличивают число фаз и тактов коммутации.

Скорости ШД с активным ротором составляют от 208 до 314 рад/с, частота приемистости от 70 до 500 Гц, номинальные вращающие моменты от $10 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-3}$ Нм [25]. Выпускается несколько серий двухфазных и многофазных ШД с постоянными магнитами на роторе.

Достоинством ШД с постоянными магнитами (активным ротором) является то, что даже при снятии питания с обмотки статора (невозбужденном ШД) ротор занимает фиксированное положение.

При необходимости получения небольших шагов и в то же время больших частот приемистости используют ШД с пассивным ротором, которые делятся на реактивные и индукторные. Работа таких ШД основана на взаимодействии магнитного поля и ферромагнитного тела.

Статор и ротор реактивного ШД имеют явно выраженные полюсы (зубцы). На зубцах статора размещаются обмотки возбуждения, питаемые от электронного коммутатора. Ротор выполнен из ферромагнитного материала и не имеет обмоток возбуждения (пассивный).

Отличительная особенность реактивного ШД заключается в неравенстве зубцов статора z_c и ротора z_p (обычно $z_p > z_c$). Вследствие такой конструкции при каждом переключении обмоток статора ротор совершает шаг α , равный разности полюсных делений статора τ_c и ротора τ_p , а именно

$$\alpha = \tau_c - \tau_p = 360^\circ / z_c - 360^\circ / z_p = 360^\circ \cdot (z_p - z_c) / (z_p \cdot z_c).$$

Уменьшив разность чисел зубцов z_c и z_p , можно снизить шаг ротора. Практически эту разность выбирают четной, что улучшает использование ШД.

Реактивные ШД при простоте и технологичности конструкции, малых размерах шагов имеют существенный недостаток – незначительные мощность и синхронизирующий момент, что ограничивает их применение.

Этого недостатка лишены индукторные ШД, в которых для увеличения синхронизирующего момента ротор подмагничивается со стороны статора с помощью постоянных магнитов или дополнительной обмотки возбуждения.

Промышленностью выпускается несколько серий ШД с пассивным ротором, имеющих шаг от 1.5° до 9° и частоту приемистости до 1200 Гц.

Развитие дискретного электропривода привело к созданию специальных видов ШД – линейных, волновых, с малоинерционным и катящимся ротором [26].

Особенно широкое применение в последнее время получили *гибридные двигатели*. Они являются более дорогими, чем ШД с постоянными магнитами, зато обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость [7].

Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага $3.6\text{--}0.9$ град.). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Их механические части могут вращаться с большими скоростями, чем другие типы шаговых моторов. Этот тип двигателей используется в станках ЧПУ *high-end* класса и в роботах. Главный их недостаток – высокая стоимость.

Обычный двигатель с 200 шагами на оборот будет иметь 50 положительных и 50 отрицательных полюсов с 8 обмотками (4 пары). Из-за того, что такой магнит нельзя произвести, было найдено элегантное решение. Берется два отдельных 50-зубых диска. Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит (рис. 49а). Диски привариваются один к положительному, другой к отрицательному полюсам постоянного магнита. Таким образом, один диск имеет положительный полюс на своих зубьях, другой – отрицательный.

Диски размещаются таким образом, что если посмотреть на них сверху, то они выглядят как один 100-зубый диск! Возвышения на одном диске совмещаются со впадинами на другом (рис. 49б). Ротор двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет две фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, 1.8 град.

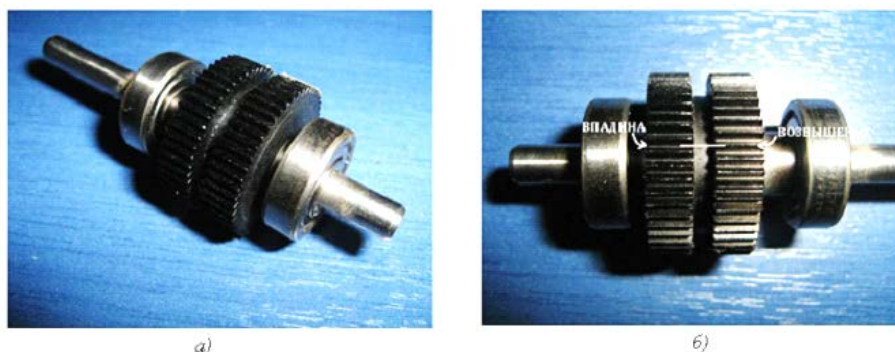


Рис. 49. Конструкция ротора гибридного ШД:

а – размещение двух 50-зубых дисков сверху и снизу постоянного магнита; б – выравнивание впадин на одном диске с возвышениями на другом

3.7.3. Схемы управления электроприводами с ШД

Управление вращением выходного вала ШД осуществляется подачей на обмотки возбуждения статора определенной последовательности импульсов напряжения.

Функциональная схема электропривода с четырехфазным ШД, который широко распространен в промышленных автоматизированных системах, представлена на рис. 50 [26].

Управление ШД может осуществляться по разомкнутой схеме, выделенной на рис. 50 штриховой линией.

Сигнал управления f_{y1} в виде импульсов напряжения поступает на вход формирователя импульсов (ФИ) от программного или другого внешнего командного устройства. Блок ФИ видоизменяет входные импульсы, формируя их по длительности и амплитуде, которые необходимы для нормальной работы распределителя импульсов (РИ). Назначение РИ – преобразование последовательности входных импульсов в четырехфазную систему однополярных импульсов напряжения, соответствующую числу обмоток на статоре двигателя.

Импульсы с выхода РИ усиливаются с помощью промежуточного усилителя (ПУ) и поступают на коммутатор (К), питающий обмотки ШД. В коммутаторе эти импульсы обеспечивают управление

силовыми элементами усилителя (транзисторами), работающими в режим ключа (для ШД небольшой мощности), или тиристорами (для мощных ШД). Блоки ФИ, РИ, ПУ питаются от общего блока питания БП. Коммутатор питается от мощного источника постоянного тока – блока выпрямителей (на рис. 50 не показан), который обеспечивает в обмотках ШД пульсирующий ток одного направления.

Рассмотренная разомкнутая схема управления ШД не всегда обеспечивает требуемые динамические свойства, точность и энергетические показатели дискретного привода. Поэтому современные схемы управления ШД содержат дополнительные устройства: БПРТ – блок плавного разгона и торможения (задатчик интенсивности), БЭДШ – блок электронного дробления шага, ЧИРН – частотно-импульсный регулятор напряжения, УОС – усилитель обратной связи по току, ДП – датчик положения ротора и скорости, ЦР – цифровой регулятор.

Блок ЧИРН совместно с УОС предназначен для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания его момента, что существенно улучшает энергетические показатели работы двигателя. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току U_{oc} , сигнал которой снимается с резистора, включенного в общую шину питания обмоток ШД. Разность сигналов U_{oc} и задающего U_z образует сигнал управления, который поступает на вход УОС. С помощью этого сигнала за счет изменения частоты переключения ЧИРН (частотно-импульсная модуляция) изменяется среднее значение напряжения питания и тем самым регулируется ток в обмотках ШД.

Для улучшения качества движения вала ШД при низких частотах и повышения точности обработки входных импульсов управления с помощью БЭДШ уменьшается единичный шаг двигателя.

Расширение динамических свойств привода, в частности увеличение диапазона рабочих частот входного сигнала, значительно превышающих частоту приемистости двигателя, может быть достигнуто введением в схему блока БПРТ, обеспечивающего разгон и торможение ШД с заданным темпом, при котором еще не происходит пропуска управляющих импульсов. При использовании БПРТ область рабочих частот ШД может быть расширена в 2–3 раза.

По своей природе электроприводы на базе ШД являются разомкнутыми и обеспечивают заданную точность при соблюдении вышеуказанных правил ограничения частоты управляющих импульсов в зависимости от характера нагрузки.

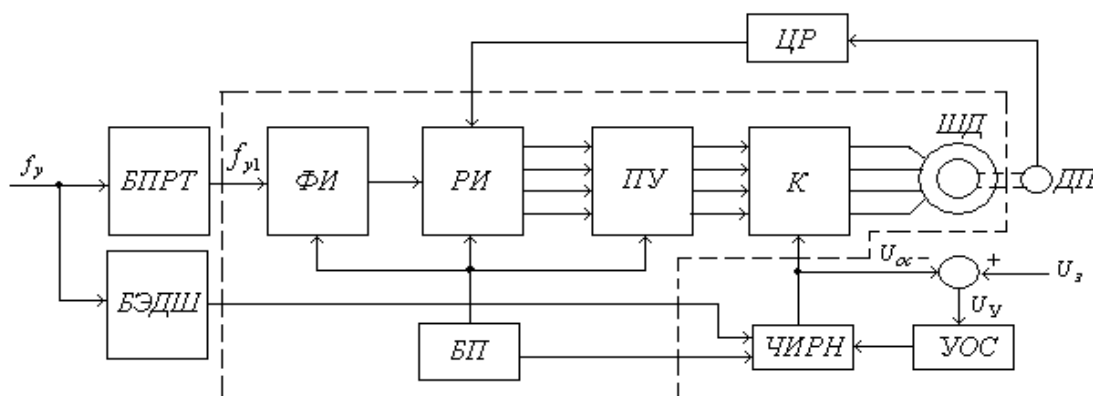


Рис. 50. Функциональная схема электропривода с ШД

Однако иногда возможности дискретного электропривода расширяют за счет создания замкнутых структур, выполняемых с помощью блоков датчика положения ротора (ДПР) и цифрового регулятора (ЦР). В таком приводе информация о действительном положении и скорости вала ШД поступает на вход ЦР, который обеспечивает заданные движения привода.

3.7.4. Основные характеристики ШД

Область применения дискретного электропривода очень широкая. Его используют в механизмах подачи станков, нажимных устройствах прокатных станов, лентопотяжных устройствах, для роботов и манипуляторов, для производства микроэлектроники, в медицинской технике и т.д.

Рассмотрим основные технические характеристики ШД, которые используются на практике [36]:

1. *Количество полных шагов за один оборот* – это основной параметр двигателя, определяющий его точность, разрешающую способность, плавность движения.
2. *Угол полного шага* показывает, на какой угол повернется вал при одном полном шаге. Подсчитывается как $360^\circ / \text{количество полных шагов на оборот}$.

3. *Номинальный ток* – наибольший допустимый ток, при котором двигатель может работать сколь угодно длительное время. Для этого тока указаны механические параметры двигателя.
4. *Сопротивление (активное) обмотки фазы* – сопротивление обмотки фазы на постоянном токе.
5. *Номинальное напряжение* – допустимое постоянное напряжение на обмотке двигателя в статическом режиме. Часто этот параметр не приводится, вычисляется по закону Ома через номинальный ток и сопротивление обмотки.
6. *Индуктивность фазы*. Параметр становится важным на значительных скоростях вращения. От него зависит скорость нарастания тока в обмотке. При высоких частотах переключения фаз приходится увеличивать напряжение, чтобы ток нарастал быстрее.
7. *Вращающий момент* показывает максимальный вращающий момент, который способен создать двигатель. Иногда приводится механическая характеристика в виде зависимости вращающего момента от частоты вращения.
8. *Момент инерции ротора* характеризует механическую инерционность ротора: чем меньше этот параметр, тем двигатель быстрее разгоняется.
9. *Удерживающий момент* – это вращающий момент при остановленном двигателе. При этом должны быть запитаны две фазы номинальным током.
10. *Стопорный момент* – момент, необходимый чтобы повернуть вал двигателя при отсутствии напряжения питания.
11. *Сопротивление изоляции* – сопротивление между корпусом и обмотками.
12. *Пробивное напряжение* – минимальное напряжение, при котором происходит пробой изоляции между корпусом и обмотками.

3.7.5. Достоинства и недостатки ШД

К преимуществам ШД следует отнести [36]:

- точное позиционирование без обратной связи;
- число импульсов определяет угол поворота;
- двигатель обеспечивает полный вращающий момент при снижении скорости вращения вплоть до остановки;
- двигатель фиксирует свое положение при остановке за счет тока удержания;
- регулировка скорости вращения с высокой точностью без обратной связи;
- способность быстрого старта, остановки, реверса;
- высокая надежность, отсутствие коллекторных щеток.

ШД имеют следующие недостатки [36]:

- невысокие скорости вращения;
- сложная система управления;
- потеря позиции при механических перегрузках;
- низкая удельная мощность;
- возможно явление резонанса.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение шагового двигателя.
2. Какова величина шага при симметричной и несимметричной коммутациях обмоток двигателя? Как получить «дробление» шага двигателя?
3. Что такое частота приемистости?
4. Приведите формулу для определения скорости вращения вала ШД.
5. В чем заключается основное достоинство ШД с активным ротором? Какова величина шага?
6. Конструктивные особенности реактивных и индукторных ШД с пассивным ротором.
7. Особенности конструкции гибридных ШД и причины их широкого применения.
8. Какие устройства добавляются к разомкнутой схеме управления ШД в современных приводах?
9. Дайте определения *удерживающему* и *стопорному* моментам ШД.

4. Отечественные промышленные сервоприводы типов СПС 25 и СПШ с векторным управлением

Для решения комплексных задач в сфере промышленной автоматизации широкое применение находят сервоприводы переменного тока с частотным управлением.

Сервоприводами называются специализированные исполнения электроприводов с главной отрицательной обратной связью по положению, обеспечивающих точное регулирование параметров движения [44] и используемых в *позиционных и следящих* автоматизированных системах. Сервопривод включает в себя все необходимое для обеспечения заданных параметров управления движением объекта в различных режимах работы, а именно:

- механический модуль, предназначенный для высокоточного перемещения объекта в горизонтальной или вертикальной плоскости;
- исполнительный электрический двигатель переменного тока;
- высокоточный цифровой датчик, предназначенный для измерения позиции и скорости перемещения объекта управления;
- преобразователь частоты, обеспечивающий реализацию векторного управления двигателем;
- блок управления (БУ), включающий сервоконтроллер и программируемый логический контроллер (ПЛК); БУ обеспечивает работу с дробными числами и позволяет реализовывать достаточно сложные алгоритмы управления без использования контроллера верхнего уровня; имеет цифровые порты ввода/вывода с оптической развязкой и обладает возможностью сетевого взаимодействия, управления по сети удаленными приводами;
- специализированное программное обеспечение, предназначенное:
 - для написания, настройки и анализа программ для сервопривода;
 - адаптации универсальных приводов к конкретной задаче;
 - отображения в реальном времени всех динамически изменяемых параметров привода (токов, напряжений, скорости, позиции и т.д.).

В настоящее время на рынке появилась продукция отечественных разработчиков и производителей высокотехнологичной продукции, способная удовлетворить потребности самого взыскательного потребителя, не заставляя его переплачивать в разы по сравнению с продукцией иностранного производства [14].

Для приобретения студентами навыков работы с современным оборудованием в лаборатории автоматизации филиала «Протвино» государственного университета «Дубна» созданы три лабораторных стенда на базе отечественных комплектных сервоприводов СПС 25, выполненных на базе синхронных двигателей с векторным управлением и отечественного интегрированного сервопривода СПШ, выполненного на основе гибридного шагового двигателя с векторным управлением по скорости и моменту.

4.1. Конструкция и технические характеристики сервоприводов СПС 25

СПС 25 – комплектный сервопривод на базе *синхронного* двигателя с векторным управлением, состоящий из серводвигателя с датчиком позиции и сервоусилителя [30]. На лабораторных стендах используются два комплектных сервопривода СПС 25 с модулями линейных перемещений:

- на базе серводвигателя *СПС-80.016.075-B0-ABZ-2048* мощностью 750 Вт, без электромагнитного тормоза; энкодер квадратурный с Z-меткой, разрешение 8192 имп/оборот; в качестве исполнительного механизма используется модуль линейных перемещений AP-1 [25];
- на базе серводвигателя *СПС-80.007.033-B0-ABZ-2048* мощностью 330 Вт, без электромагнитного тормоза; энкодер квадратурный с Z-меткой, разрешение 8192 имп/оборот; в качестве исполнительного механизма используется модуль линейных перемещений СТМ-2 [10].

В обоих электроприводах используются сервоусилители типа *СПС-25-12А-Е1*, имеющие интерфейс *Ethernet* и рассчитанные на максимальный ток 12А [30].

Назначение модулей линейных перемещений – осуществление точного и плавного перемещения устанавливаемых на них объектов по прямой траектории в заданную координату.

Сервоприводы СПС25 комплектуются следующими интерфейсами [30]:

- технологический интерфейс *USB*, с помощью которого можно выполнять настройку параметров привода, анализировать его работу и управлять им в ручном режиме;

- CAN-интерфейс, предназначенный для управления в режиме реального времени;
- интерфейс *Step/Dir* для задания позиции вала двигателя;
- аналоговый интерфейс $\pm 10\text{В}$ для задания скорости вращения;
- интерфейс цифрового входа/выхода с оптической развязкой (2 цифровых выхода, 4 цифровых входа общего назначения).

Сервоприводы СПС 25 обеспечивают следующие режимы работы [30]:

- управление позицией вала с функцией плавного разгона и торможения;
- управление скоростью;
- управление моментом;
- отработка программ движения пользователя;
- электронный редуктор;
- режим синхронизации группы приводов (выполнение циклических операций с синхронизацией по шине CAN);
- тестовый режим; с его помощью можно установить стандартные функции задания для электропривода (ступенька, синус) и проанализировать качество переходных процессов.

4.1.1. Комплектный сервопривод СПС 25 мощностью 750 Вт

Конструктивно в его состав входят [30]: серводвигатель СПС-80.016.075, сервоусилитель СПС25-12А, модуль линейных перемещений АР-1 [25] в качестве исполнительного механизма.

Серводвигатель СПС-80.016.075. Основные технические характеристики синхронного двигателя СПС-80.016.075 указаны в табл. 5, а его механическая характеристика приведена на рис. 51.

Таблица 5. Основные технические характеристики синхронного двигателя СПС-80.016.075

Выходная мощность, Вт	750
Номинальный ток, А	3.3
Максимальный импульсный ток, А	10
Напряжение питания, В	310VDC $\pm$ 10%
Номинальный момент, Нм	1.6
Максимальный момент, Нм	4.8
Номинальная скорость, об/мин	4500
Момент инерции вала ротора, кг·см ²	0.72
Сопротивление обмотки, Ом	2.6
Индуктивность обмотки, мГн	11.5
Количество пар полюсов	2
Разрешение энкодера, имп/оборот	8192
Наличие нулевой метки	Да
Допустимая эксплуатационная температура окружающей среды, °С	0...+50
Температура хранения, °С	–25...+50
Исполнение серводвигателя	IP54
Масса серводвигателя, кг	2.85

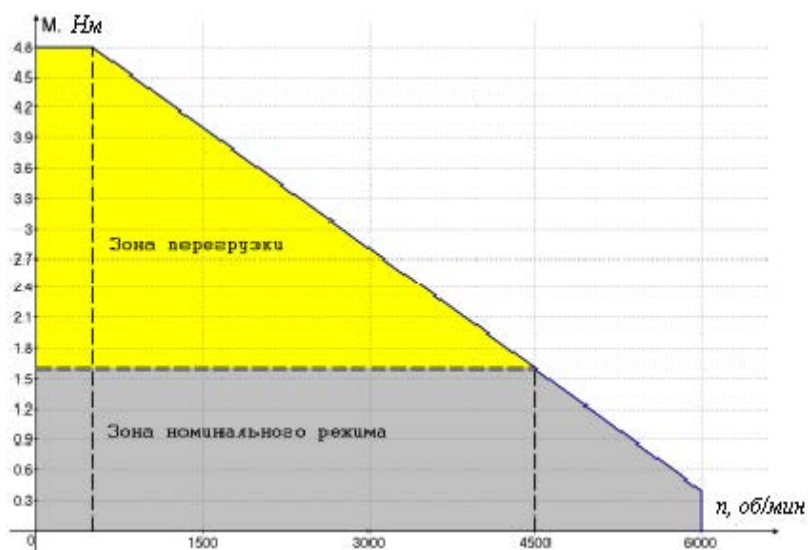


Рис. 51. Механическая характеристика серводвигателя СПС-80.016.075

Сервоусилитель СПС25-12А. Сервоусилитель обеспечивает подчиненное управление [3; 12], т.е. замкнутое регулирование по трем контурам: внутреннему контуру тока (момента), контуру скорости, внешнему контуру позиции.

Внешний вид сервоусилителя СПС25-12А показан на рис. 52, основные технические характеристики приведены в табл. 6 [30].

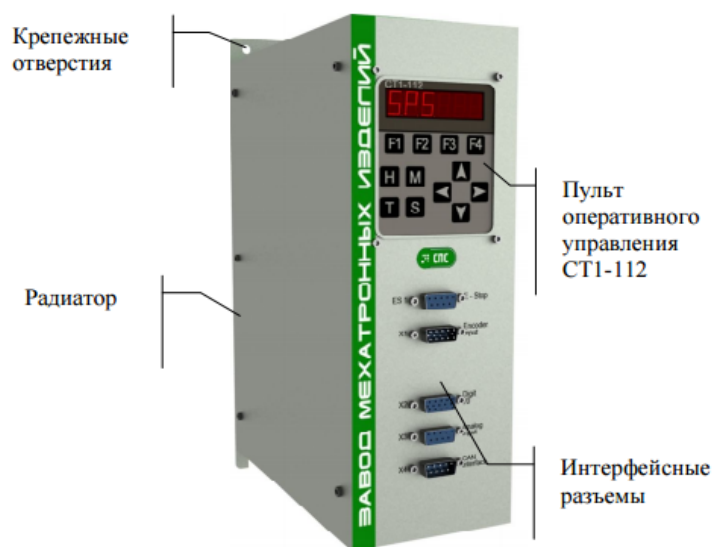


Рис. 52. Внешний вид сервоусилителя СПС25-12А

Таблица 6. Основные технические характеристики сервоусилителя СПС25-12А

Выходная мощность, Вт	1100
Номинальный ток, А	5
Максимальный импульсный ток, А	12
Напряжение питания, В	$\sim 220 \text{ В} \pm 10\%$
Наличие нулевой метки	да
Допустимая эксплуатационная температура окружающей среды, °С	0...+40
Температура хранения, °С	-25...+50
Исполнение сервоусилителя	IP20
Масса сервоусилителя, кг	2.2

В состав сервоусилителя входит пульт оперативного управления СТ1-112, который при выполнении лабораторных работ не используется.

Модуль линейных перемещений АР-1. Модуль линейных перемещений АР-1 [25] используется в качестве исполнительного механизма сервопривода СПС-80.016.075. Модуль АР-1 с механической передачей движения через пару шестеренка-рейка предназначен для перемещения грузов массой до 50 кг на длинные расстояния со скоростью до 1.6 м/с. Основой модуля служит алюминиевое основание шириной 130 мм с интегрированными в него стальными валами. Конструкция модуля приведена на рис. 53, его размеры – на рис. 54, а технические характеристики – в табл. 7.

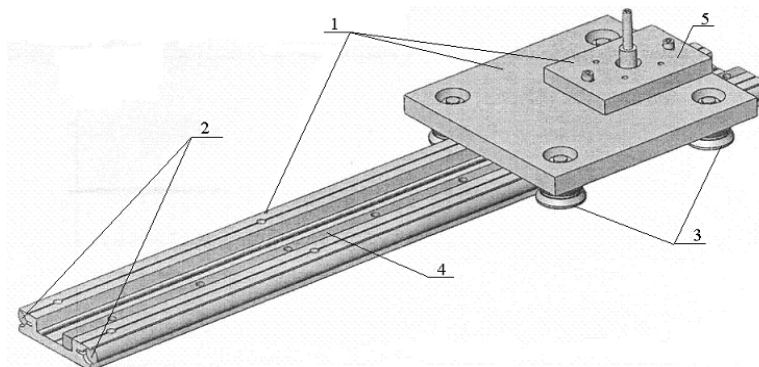


Рис. 53. Конструкция модуля АР-1:

1 – алюминиевые детали; 2 – стальные валы (*HRC* 62); 3 – высокопрочные колеса с японскими подшипниками; 4 – рейка-шестеренка; 5 – каретка, подготовленная под установку нагрузки

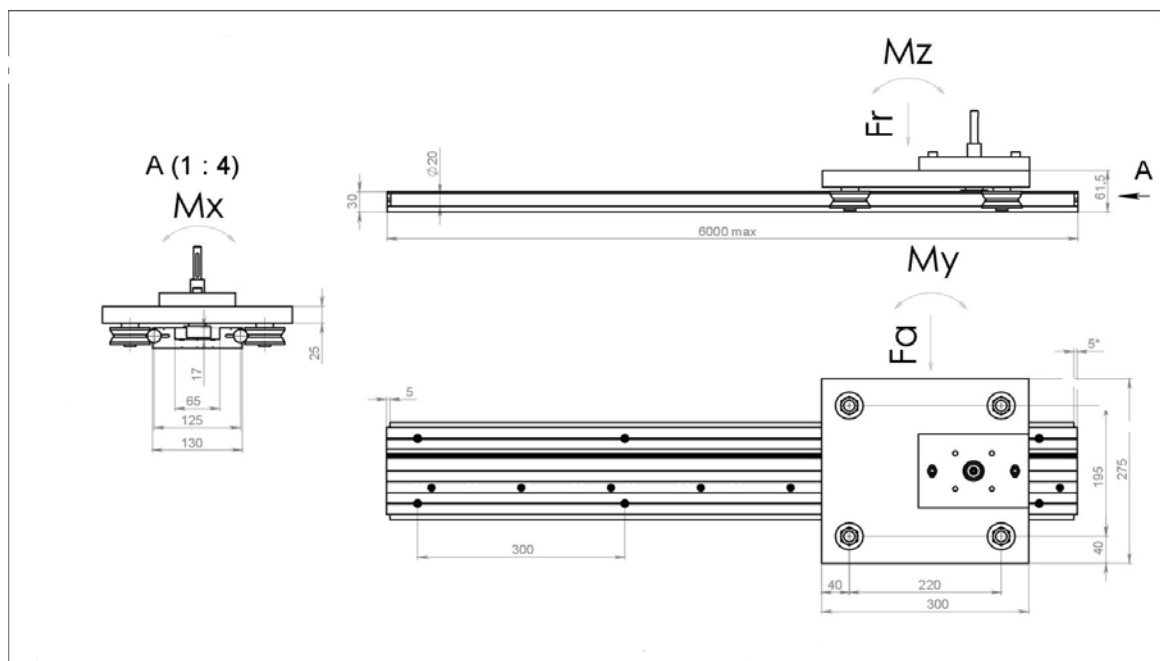
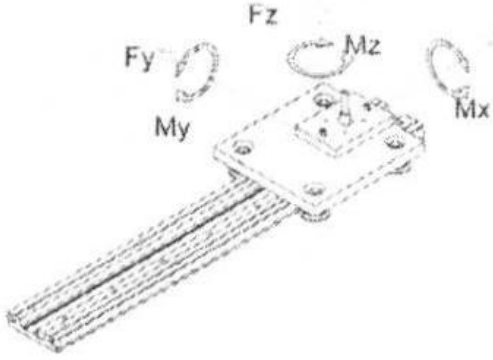


Рис. 54. Размеры модуля АР-1

Таблица 7. Основные технические характеристики модуля АР-1

Стандартный размер рабочей поверхности каретки – длина × ширина, мм	275 × 300
Стандартный способ фиксации перемещаемого изделия	На верхнюю поверхность каретки через резьбовые соединения
Расстояние между нижней поверхностью основания и верхней поверхностью каретки, мм	61.5
Вес 1000 мм, кг	10.8
Минимально возможный ход модуля по упорам (<i>S</i>), мм	10

Максимально возможный ход модуля по упорам (S), мм	2000 при максимальной длине одной секции – 6000
Тип механической передачи	рейка шестеренка $z = 24$, $m = 1.5$
Максимальная скорость перемещения (двигатель 750 Вт, редуктор с передаточным числом 5), м/с	1.6
Тип направляющих	Шлифованные валы/колеса
Количество колес, шт.	4
Нагрузочные характеристики	
Максимальные усилия, Н	
$F_{y.max}$	1860
$F_{z.max}$	4290
Максимальные опрокидывающие моменты, Нм	
$M_{y.max}$	2200
$M_{z.max}$	1727
Суммарная величина нагрузки не должна превышать следующего значения: $\frac{F_{yA}}{F_{y.max}} + \frac{F_{zA}}{F_{z.max}} + \frac{F_{xA}}{F_{x.max}} + \frac{M_{yA}}{M_{y.max}} + \frac{M_{zA}}{M_{z.max}} \leq 1$	
	

4.1.2. Комплектный сервопривод СПС25 мощностью 330 Вт

Конструктивно в его состав входят [30]: серводвигатель СПС-80.007.033, сервоусилитель СПС25-12А, модуль линейных перемещений СТМ-2 [10] в качестве исполнительного механизма.

Серводвигатель СПС-80.007.033. Основные технические характеристики синхронного двигателя СПС-80. 007.033 приведены в табл. 8, а его механическая характеристика приведена на рис. 55.

Таблица 8. Основные технические характеристики синхронного двигателя СПС-80. 007.033

Выходная мощность, Вт	330
Номинальный ток, А	1.4
Максимальный импульсный ток, А	4.2
Напряжение питания, В	$310VDC \pm 10\%$
Номинальный момент, Нм	0.7
Максимальный момент, Нм	2.1
Номинальная скорость, об/мин	4500
Момент инерции вала ротора, кг·см ²	0.48
Сопротивление обмотки, Ом	6.5
Индуктивность обмотки, мГн	32
Количество пар полюсов	2
Разрешение энкодера, имп/оборот	8192

Наличие нулевой метки	Да
Допустимая эксплуатационная температура окружающей среды, °C	0...+50
Температура хранения, °C	-25...+50
Исполнение серводвигателя	IP54
Масса серводвигателя, кг	2.05

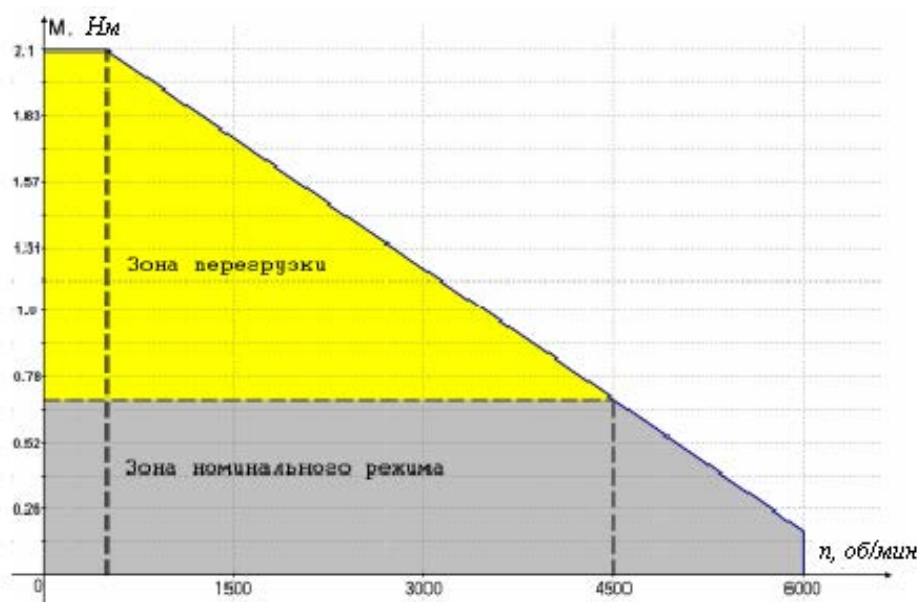


Рис. 55. Механическая характеристика серводвигателя СПС-80.007.033 мощностью 330 Вт

Модуль линейных перемещений СТМ-2 [10]. Конструктивно линейный модуль состоит из основания (несущий силовой элемент) с закрепленными на нем рельсовыми направляющими качения (рис. 56). На фланцевых опорах установлен винт ШВП, крутящий момент к которому передаётся от двигателя через компенсирующую муфту. За счёт вращения винта ШВП происходит перемещение каретки модуля, которая в свою очередь служит базовой платформой для крепления на ней всевозможных изделий или механизмов. Через специальный переходной фланец и муфту модуль стыкуется с двигателем. Основание и каретка модуля снабжены специальными технологическими элементами (отверстиями, шпоночными канавками), упрощающими процесс сборки и монтажа системы линейного перемещения. Модули серии СТМ-2 снабжены двумя шариковыми танкетками, на которые крепится каретка длиной 110 мм.

Для используемого на лабораторном стенде модуля ход каретки S составляет 1500 мм.

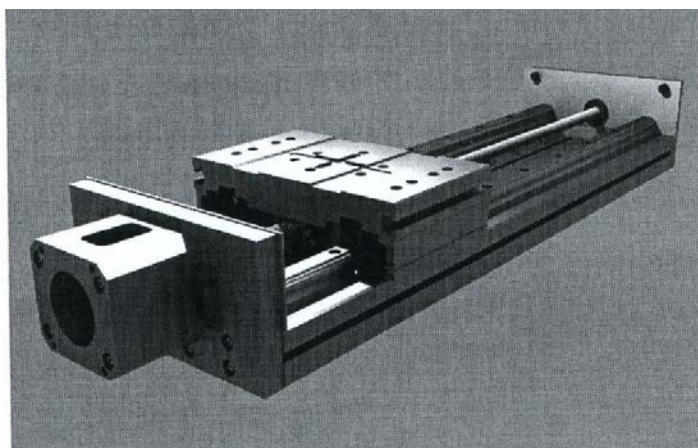
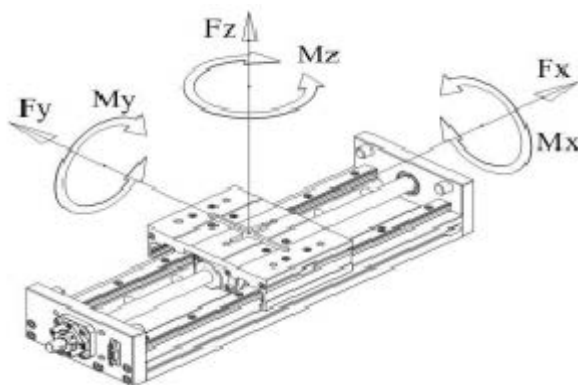


Рис. 56. Модуль линейных перемещений СТМ-2

Технические характеристики модуля СТМ-2 приведены в табл. 9.

Таблица 9. Основные технические характеристики модуля СТМ-2

Стандартный размер рабочей поверхности каретки – длина × ширина, мм	110 × 150
Стандартный способ фиксации перемещаемого изделия	На верхнюю или боковую поверхность каретки через резьбовые соединения
Расстояние между нижней поверхностью основания и верхней поверхностью каретки, мм	71
Минимально возможный ход модуля по упорам (S), мм	90
Максимально возможный ход модуля по упорам (S), мм	1230
Тип направляющих	Рельсовые качения
Количество шариковых танкеток, шт.	2
Тип механической передачи	ШВП (класс точности – C5) диаметр винта – 16 мм шаг винта – 10 мм
Максимальная частота вращения винта ШВП, об/мин	5000
Ошибка шага (на один оборот), мкм	8
Точность позиционирования на длине 300 мм, мкм	23
Повторяемость, мкм	+– 25
Скорость быстрых перемещений модуля, мм/с	800
Нагрузочные характеристики	
Допустимая динамическая нагрузка каретки модуля (Скар), Н	6500
Допустимая динамическая нагрузка ШВП, Н	1170
Динамические моменты, Нм	
<i>M_{x.дин}</i>	302
<i>M_{y.дин}</i>	38
<i>M_{z.дин}</i>	38
Максимальные усилия, Н	
<i>F_{x.max}</i>	1170
<i>F_{y.max}</i>	1860
<i>F_{z.max}</i>	4290
Максимальные опрокидывающие моменты, Нм	
<i>M_{x.max}</i>	150
<i>M_{y.max}</i>	25
<i>M_{z.max}</i>	25



Суммарная величина нагрузки не должна превышать следующего значения:

$$\frac{F_{yA}}{F_{y.max}} + \frac{F_{zA}}{F_{z.max}} + \frac{M_{xA}}{M_{x.max}} + \frac{M_{yA}}{M_{y.max}} + \frac{M_{zA}}{M_{z.max}} \leq 1$$

4.2. Конструкция и технические характеристики сервопривода СПШ20

СПШ 20 – это интегрированный сервопривод на базе гибридного шагового электродвигателя (§ 3.6.2, рис. 49), в котором используется бесшаговое (векторное) управление на основе адаптированного специально для шаговых двигателей алгоритма [17].

Реализуются следующие режимы работы сервопривода СПШ20:

- управление позицией вала с функцией плавного разгона и торможения с исключением двух диапазонов резонансных частот;
- управление скоростью с функцией плавного разгона и торможения с исключением двух диапазонов резонансных частот;
- управление моментом;
- отработка программ движения пользователя;
- электронный редуктор;
- режим синхронизации группы приводов (выполнение циклических операций с синхронизацией по шине CAN);
- тестовый режим; с его помощью можно установить стандартные функции задания для электропривода (ступенька, синус) и проанализировать качество переходных процессов.

Сервоприводы серии СПШ оснащены встроенной защитой от короткого замыкания, перегрева, повышенного и пониженного напряжения, превышения внешнего момента.

4.2.1. Интегрированный сервопривод СПШ20-34100

На лабораторном стенде в состав интегрированного сервопривода СПШ20 включены гибридный шаговый электродвигатель, блок управления, источники питания силовой части и блока управления, модуль линейного перемещения МР110.

Для питания блока управления привода используют стабилизированный источник питания напряжением $15\text{ В} \pm 10\%$ постоянного тока, мощностью не менее 5,25 Вт на один привод. Пульсации не более 100мВ. Работа с нестабилизированным источником питания не допускается. Питание силовых цепей привода осуществляют от нестабилизированного источника.

Основные технические характеристики сервопривода СПШ20-34100 [17] приведены в табл. 10, механические характеристики – на рис. 57.

Таблица 10. Основные технические характеристики сервопривода СПШ20-34100

Выходная мощность, Вт	270
Момент удержания, Нм	10
Напряжение питания силовой части, В	48–120
Номинальный ток, А	6.5
Напряжение питания блока управления, В	15
Максимальный ток потребления блока управления, А	0.35
Момент инерции вала ротора, кг·см ²	4
Разрешение энкодера, имп/оборот	1000 или 2000
Номинальная скорость, об/мин	4500
Наличие нулевой метки	Да
Допустимая эксплуатационная температура окружающей среды, °С	–20...+50
Температура хранения, °С	–40...+50
Исполнение серводвигателя	IP54
Масса серводвигателя, кг	6.4

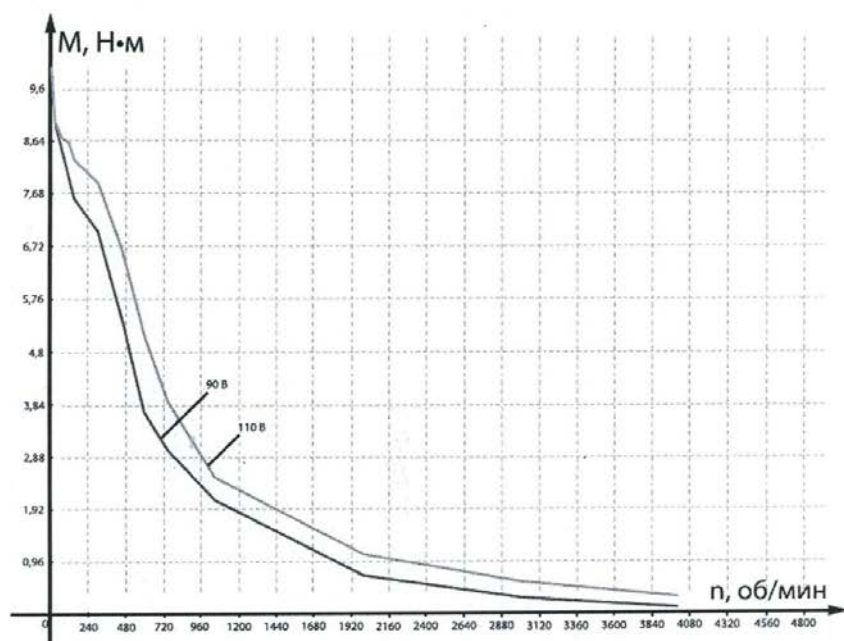


Рис. 57. Механические характеристики СПШ20-34100 при различных значениях питающего напряжения

Модуль линейных перемещений МР110. Модуль линейного перемещения МР110 [31] (рис. 58) разработан и выпускается компанией ЗАО «ЗМИ» для обеспечения перемещения объектов массой до 100 кг со скоростью до 3 м/с на расстояние до 5700 мм.

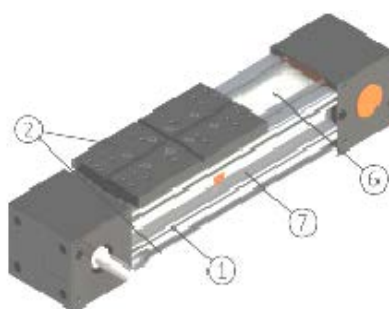


Рис. 58. Модуль линейного перемещения МР110:

1 – жесткий и одновременно легкий анодированный профиль 110×90 мм; 2 – прецизионная каретка модуля для высокоточного крепления перемещаемого изделия; 6 – герконовые концевые выключатели, выведенные на разъем DB-9M; 7 – Т-образные пазы для крепления дополнительных устройств

Технические характеристики используемого на лабораторном стенде модуля линейного перемещения МР110 приведены в табл. 11.

Таблица 11. Технические характеристики модулей линейного перемещения серии МР110/МРУ110

Серия линейного модуля	МР110	МР110 с защитной лентой	МРУ110	МРУ110 с защитной лентой
Размер рабочей поверхности каретки, мм	210×110	210×110	310×110	310×110
Вес при ходе 100 мм	11,46	12,23	13,46	13,97
Вес каждые 100 мм	1,17	1,34	1,13	1,39
Перемещения				
Минимальный ход (S), мм	100	100	100	100
Максимальный ход (S), мм	5700	5700	5600	5600
Тип механической передачи	ремень AT5×50	ремень AT5×32	ремень AT5×50	ремень AT5×32
Перемещение каретки на 1 оборот шкива, мм	194,2			
Предел упругости ремня (N/мм ²)	4200	2740	4200	2740
Повторяемость, мкм	±50			
Нагрузочные характеристики				

Динамические моменты, Нм				
M.x.дин	141			
M.y.дин	643	1256		
M.z.дин	643	1256		
Максимальные усилия, Н				
F.x.max	980	520	980	520
F.y.max	6000			
F.z.max	12000			
Алюминиевый профиль				
Момент инерции x(см ⁴)	246,59			
Момент инерции y(см ⁴)	447,3			
Модуль продольной упругости-E (N/мм ²)	70000			
Суммарная величина нагрузки не должна превышать следующего значения:				
$\frac{F_{y.A}}{F_{y.max}} + \frac{F_{z.A}}{F_{z.max}} + \frac{M_{x.A}}{M_{x.max}} + \frac{M_{y.A}}{M_{y.max}} + \frac{M_{z.A}}{M_{z.max}} \leq 1$				

Основой модуля служит анодированное алюминиевое основание (несущий силовой элемент) с интегрированными шлифованными валами. Крутящий момент передаётся от двигателя через шкив к полиуретановому ремню типа АТ. Базовой платформой для крепления изделий служит каретка с установленными на ней колесами, обеспечивающими высокоскоростное перемещение. Материал основания – высокопрочный алюминиевый сплав 6063 Т66 ГОСТ 22233-2001.

В стандартной комплектации модуль оснащен концевыми герконовыми выключателями, выводы с которых заведены в разъем DB-9M.

Благодаря опционной металлической защитной ленте подвижные элементы модуля защищены от попадания раскаленной стружки, окалины от сварки, грязи, сажи и т.д.

4.3. Системы подчиненного управления сервоприводами СПС25 и СПШ20

Системы управления сервоприводами СПС25 и СПШ20 построены по принципу подчиненного управления.

Системой подчиненного управления (СПУ) называется система автоматического управления, состоящая из нескольких вложенных друг в друга замкнутых контуров, настроенных так, что внутренний контур подчиняется внешнему контуру, который вырабатывает сигнал управления для внутреннего контура и управляет им [3; 12]. Классическая структура СПУ для трех контуров показана на рис. 59. Каждый из контуров содержит свой собственный регулятор и датчик регулируемой величины.

Первый (внутренний) контур – контур регулирования момента (тока) двигателя. Этот контур содержит регулятор момента двигателя (РМ), датчик момента (ДМ), объединенные в блок W_{01} силовой преобразователь и статорную обмотку двигателя. С помощью датчика ДМ осуществляется жесткая обратная связь (ЖОС) по моменту (току). Задающим сигналом для первого контура является сигнал задания момента $U_{\text{зм}}$ с выхода регулятора скорости РС.

Второй контур, которому подчинен первый, – контур регулирования угловой скорости двигателя ω . Он содержит регулятор скорости (РС), первый контур, двигатель (блок W_{02}) с его механической характеристикой $\omega = f(M)$, датчик скорости (ДС) для реализации жесткой обратной связи по скорости. Задающим сигналом для второго контура является сигнал задания скорости $U_{\text{зс}}$ с выхода регулятора положения объекта управления РП.

Третий (главный) контур, которому подчинен второй, – контур регулирования положения S объекта управления. Он содержит регулятор положения (РП), второй контур, кинематическую передачу между валом двигателя и объектом управления (W_{03}), датчик положения (ДП) для реализации ЖОС по положению.

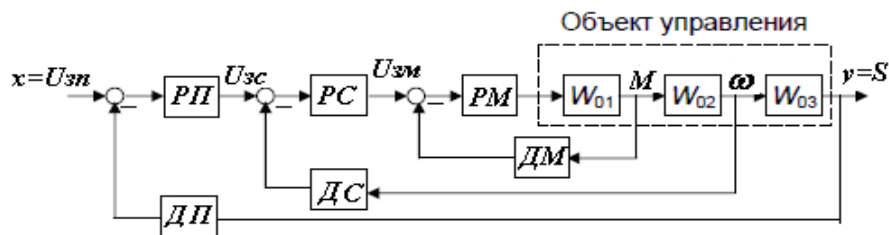


Рис. 59. Структура системы подчиненного управления

Итак, каждый внутренний контур подчинен следующему по порядку внешнему. Эта подчиненность выражается в том, что заданное значение переменной во внутреннем контуре определяется выходным сигналом следующего по порядку внешнего. В результате все внутренние контуры работают как подчиненные задаче регулирования выходной величины системы. Достоинства СПУ определяются возможностью реализации следующих процедур:

- 1) раздельная настройка контуров, начиная с первого самого внутреннего контура;
- 2) коррекция переходных процессов отдельно в каждом контуре, что существенно упрощает практическую настройку системы;
- 3) раздельное регулирование переменных.

Настройка контура включает *выбор типа регулятора и определение его параметров*.

Выбор типа регулятора производят в зависимости от структуры и параметров объекта управления, требований к статическим и динамическим свойствам контура. Наиболее широкое применение в СПУ нашли следующие типы регуляторов: пропорциональные (П-регуляторы), пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы), пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

Для сервоприводов СПС25 и СПШ20 [16]:

- в контуре регулирования момента в качестве РМ используется ПИ-регулятор;
- в контуре регулирования скорости в качестве РС используется ПИД-регулятор;
- в контуре регулирования положения в качестве РП используется ПИ-регулятор.

Определение параметров регулятора выполняется, исходя из необходимости получения технически оптимального переходного процесса в каждом контуре (настройка на технический оптимум).

Технически оптимальным считается такой переходный процесс, при котором время t_1 изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании $\sigma = (A_1 / \omega_{уст}) \cdot 100\%$, не превышающим 4–10% (рис. 60) [3; 12].

Такой переходный процесс при ступенчатом входном воздействии является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

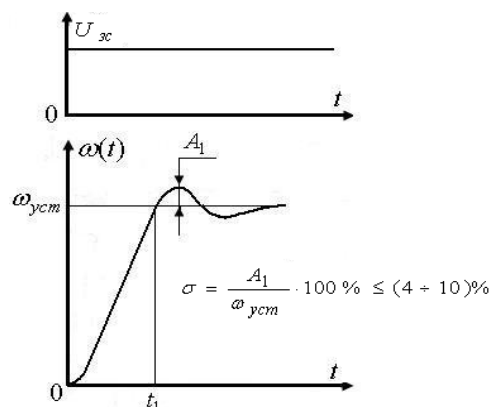


Рис. 60. К настройке на технический оптимум

4.4. Программное обеспечение *МотоМастер*©

Система управления каждым сервоприводом укомплектована отдельным компьютером, на котором установлена программа *МотоМастер*© [17], предназначенная для настройки сервопривода

и разработки программ движения. С помощью данной программы можно выполнить следующие действия:

- просмотр и редактирование параметров привода и режимов его работы;
- ручное управление сервоприводом;
- разработка и отладка программ для программируемого логического контроллера привода;
- анализ динамических процессов, протекающих в приводе в режиме реального времени.

4.4.1. Графический интерфейс *МотоМастер*©

Графический интерфейс программы *МотоМастер*© [17] представлен на рис. 61.

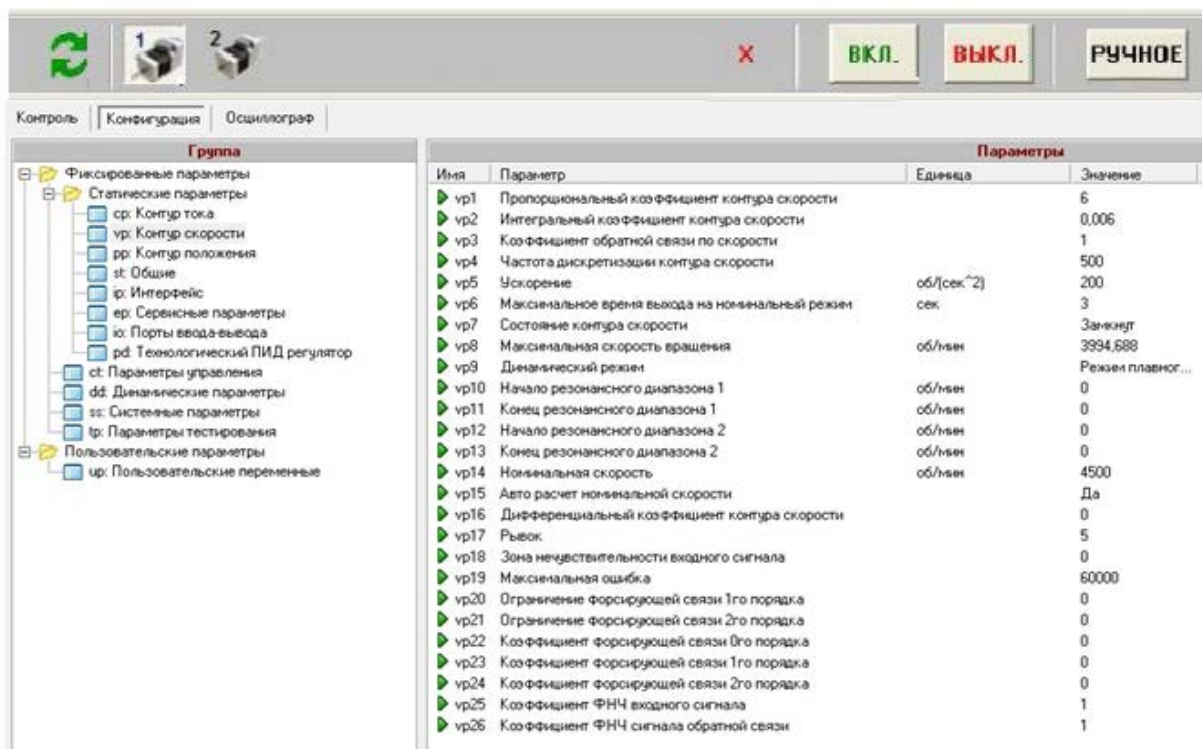


Рис. 61. Графический интерфейс программы *МотоМастер*©

4.4.1.1. Контрольная панель

Контрольная панель предназначена для выбора режимов работы *МотоМастера*© [17].

При загрузке *МотоМастера*© выполняет автоматический поиск всех подключенных к компьютеру приводов, на контрольной панели интерфейса (рис. 62) под номерами 1–6 появляются условные изображения найденных приводов. Для выполнения повторного поиска нажмите кнопку 1 (рис. 62).

Для подключения к одному из обнаруженных приводов нажмите соответствующий номер привода из группы кнопок 2 (рис. 62). Кнопки 3, 4, 5, 6 становятся активными только после подключения к одному из сервоприводов. Для закрытия текущего соединения используйте кнопку 3.

В сервоприводе предусмотрен режим безопасной настройки. Для перевода сервопривода в безопасный режим нажмите кнопку 5. В данном режиме двигатель переводится в обесточенное состояние. Безопасный режим предназначен для изменения одновременно ряда параметров привода, отдельное изменение которых может привести его в ненадлежащее состояние. Данный элемент управления также используется для экстренного останова привода.

Для переключения двигателя в рабочий режим нажмите кнопку 4.



Рис. 62. Расположение кнопок на контрольной панели

Для выполнения ручного управления сервоприводом нажмите кнопку 6. При этом появится диалоговое окно, приведенное на рис. 63.

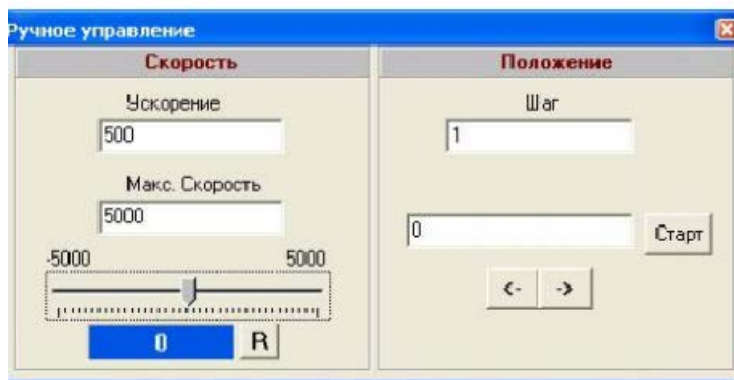


Рис. 63. Диалоговое окно ручного управления

Диалоговое окно позволяет задавать ручную текущую позицию или скорость. Для задания текущей позиции введите необходимое значение в строке редактирования в группе «Положение» и нажмите кнопку «Старт». Для перемещения вала ротора на заданное в поле «Шаг» приращение по часовой или против часовой стрелки нажмите кнопки вправо/влево соответственно. Для задания скорости вращения переместите ползунок в требуемую позицию. При этом шкалу диапазона скорости задания можно менять путем ввода значения в поле «Макс. скорость». Для установки нулевого значения скорости нажмите кнопку «R».

4.4.1.2. Просмотр и изменение параметров привода

При установленном соединении на панели «Группа» (рис. 61) отображается дерево групп параметров (подробнее § 4.4.1.7) [17]. Для просмотра параметров группы выберите ее щелчком мыши, при этом список параметров группы отобразится на панели «Параметры». Колонки панели «Параметры»:

- «имя» – внутреннее наименование;
- «параметр» – краткое описание;
- «значение» – текущее значение;
- «единица» – единицы измерения.

Параметры, доступные для записи, имеют рядом с именем значок ▷ .

Для изменения значения параметра дважды щелкните мышью на соответствующей строке или выберите параметр и нажмите «Enter». Если параметр доступен для записи, то отобразится окно редактирования значений параметра (рис. 64), если же параметр доступен только для чтения, то будет выведено соответствующее сообщение.

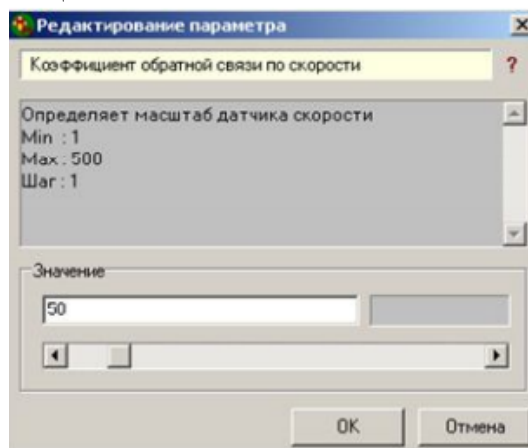


Рис. 64. Окно ввода значения параметра

В окне отображается наименование параметра. При нажатии кнопки «?» также будет выведена дополнительная информация: полное описание параметра, диапазон допустимых значений и шаг изменения. Если параметр имеет набор фиксированных значений, то значение можно выбрать с помощью выпадающего списка, в противном случае – ввести его в поле ввода вручную. В обоих случаях

значение параметра можно изменить с помощью полосы прокрутки. Нажатие на кнопку «ОК» записывает значение параметра в энергонезависимую память системы управления и закрывает окно, нажатие на кнопку «Отмена» закрывает окно без изменения значения параметра.

4.4.1.3. Работа с осциллографом

Осциллограф предназначен для построения графиков изменения параметров двигателя [17]. Для переключения в режим осциллографа щелкните левой кнопкой мыши на клавишу «Осциллограф» контрольной панели (см. рис. 61). На экран выведется окно осциллографа (рис. 65).

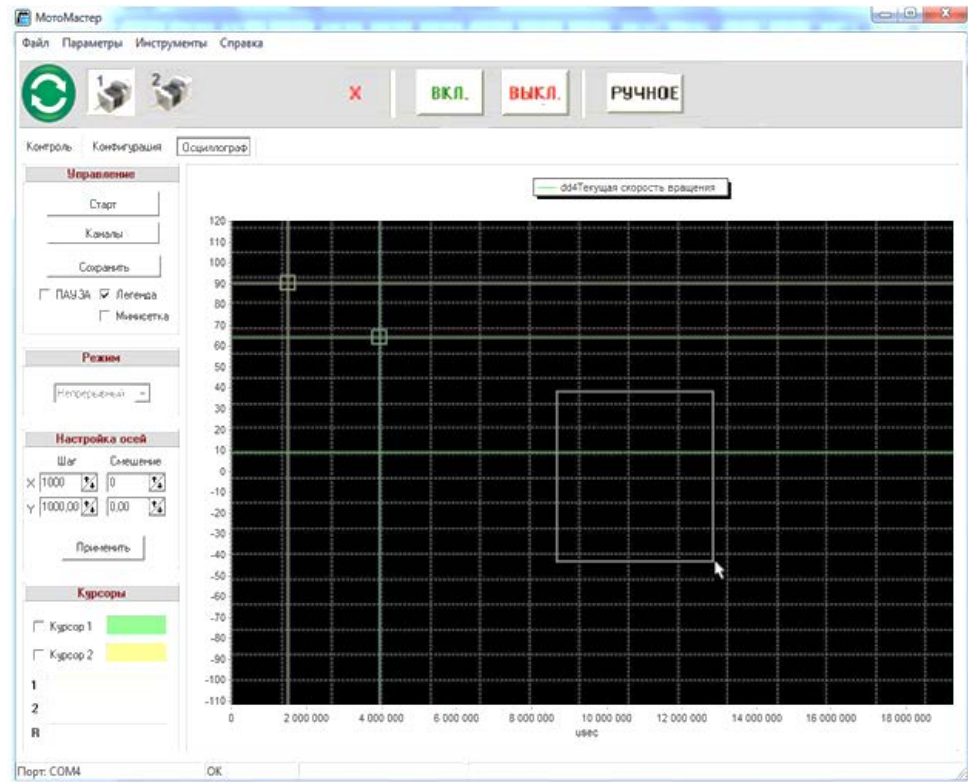


Рис. 65. Окно осциллографа

4.4.1.3.1. Выбор каналов осциллографа

Для выбора отображаемых каналов выберите кнопку «Каналы» (рис. 65). При этом отобразится окно, приведенное на рис. 66.

Каналы осциллографа					
Каналы					
Канал	Параметр	Цвет	Двигатель	Множитель	Смещение
A	dd4Текущая скорость вращения	Зеленый	0	1	0
B	dd3Текущее положение	Синий	0	1	0
C	Параметр не определен	Красный	0	1	0
D	Параметр не определен	Фиолетовый	0	1	0
E	Параметр не определен	Синий	0	1	0

Рис. 66. Окно выбора каналов осциллографа

В окне отображаются выбранные каналы. При двойном щелчке левой кнопкой мыши на строке списка отображается окно настройки канала (рис. 67).

Канал будет либо добавлен, если строка была пуста, либо изменен.

Поля «Множитель» и «Смещение» позволяют настроить индивидуально отображение каждого графика, которые позволяют выполнить масштабирование графика и его смещение относительно нулевого значения.

С помощью списка «Параметр» можно выбрать параметр для отображения.

С помощью выпадающего списка «Цвет» можно выбрать цвет, которым будет отображен график данного параметра.

Кнопка «Сброс» очищает выбранный канал.

Кнопка «Включить/Отключить» позволяет запретить/разрешить прорисовку графика изменения данного параметра.

Нажатие кнопки «ОК» сохраняет изменения канала и закрывает окно. Нажатие кнопки «Отмена» закрывает окно, не изменяя настроек канала.

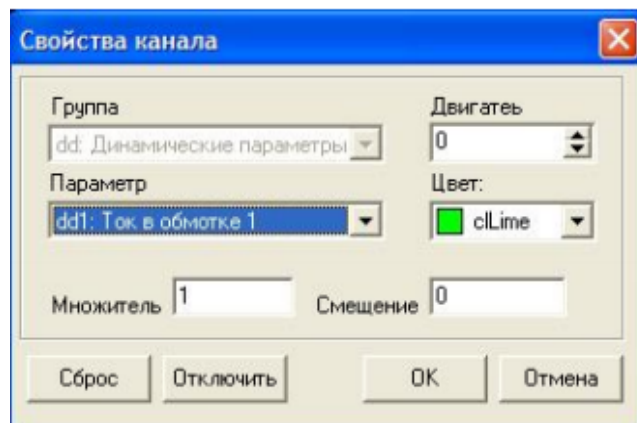


Рис. 67. Окно настройки канала

ВНИМАНИЕ! В текущей версии программного обеспечения *МотоМастер*© можно анализировать не более трех параметров, при этом среди них может быть только один 32-битный параметр (либо задание позиции, либо текущая позиция).

Параметр «Двигатель» позволяет установить порядковый номер одного из активных в текущий момент приводов. В результате в рамках одного эксперимента можно выполнить анализ динамических параметров двух и более приводов.

4.4.1.3.2. Управление осциллографом

Осциллограф может работать в двух режимах: непрерывный и режим с высоким разрешением [17]. Для запуска осциллографа нажмите кнопку «Пуск».

Непрерывный режим отображает изменение выбранных динамических параметров с частотой 20 Гц до нажатия кнопки «Стоп».

В режиме с высоким разрешением изменение параметров фиксируется в буфере самого привода с регулируемым шагом. При этом на экране будет отображена шкала прогресса выполнения заданного теста. По завершению эксперимента накопленные данные передаются в *МотоМастер*©. При этом отображается прогресс приема информации. По окончании обработки принятой информации будут отображены графики выбранных параметров.

Для увеличения отдельных участков анализируемой осциллограммы выполните следующие действия (рис. 65):

- 1) подведите курсор мыши в левый верхний угол увеличиваемого участка осциллограммы;
- 2) нажмите левую кнопку мышки;
- 3) переместите курсор мыши в правый нижний угол выделяемого участка;
- 4) отпустите кнопку мышки.

Для восстановления исходного масштаба осциллограммы выполните аналогичные действия, перемещая курсор мыши из правого верхнего угла в левый нижний.

Отображенные графики могут быть сохранены на диске. Для этого после завершения эксперимента выберите пункт меню «Файл\Сохранить график». В появившемся диалоговом окне укажите имя файла. При этом в указанном каталоге будут сохранены графический файл со снятыми переменными и текстовые файлы с таблицами значений снятых графиков.

4.4.1.3.3. Настройки внешнего вида осциллографа и отображения графиков (рис. 65)

Для отображения названий параметров установите флажок «Легенда».

Для отображения более мелкой сетки установите флажок «Минисетка».

Для настройки диапазонов отображения значений используйте параметры «Шаг» и «Смещение» для осей X и Y. При изменении шага по оси изменится диапазон отображения по этой оси. Сме-

значение определяет минимальное отображаемое значение. Графики будут изменены после нажатия кнопки «Применить».

Для отображения на экране курсоров установите флажки «Курсор 1» и «Курсор 2».

На панели «Курсоры» отобразятся позиции курсоров и разница между ними. Цвет курсоров можно изменить, щелкнув мышью на цветном прямоугольнике справа от флажка.

4.4.1.4. Программирование логического контроллера

В блок управления сервоприводом встроен программируемый логический контроллер (ПЛК) [37]. ПЛК предназначен для исполнения прикладных программ, созданных пользователем. Его основная задача – предоставить возможность автономно выполнять вспомогательные операции самим приводом без использования контроллера верхнего уровня.

К наиболее часто используемым задачам, решаемым с помощью встроенного ПЛК, относятся:

- выход в нулевую позицию по позиционному выключателю;
- аварийный останов привода в случае выхода из рабочей зоны действия;
- управление режимом работы привода;
- включение/выключение внешнего оборудования по определенным событиям.

С помощью ПЛК можно решать и более комплексные задачи: автономная работа нескольких приводов, объединенных в локальную сеть с помощью шины CAN, с целью совместного позиционирования.

Разработка программ для внутреннего ПЛК выполняется на языке *SML (Servo Motor Language)*, разработанном компанией ЗАО «Сервотехника» специально для сервоприводов [37]. Разработка и отладка программ выполняется в программе *МотоМастер*© [17], для этого в нее включен текстовый редактор (рис. 68), расположенный в окне «Контроль» (рис. 69).

При записи программы в привод компилятор, встроенный в *МотоМастер*©, проверяет синтаксис программы и в случае корректного написания выполняет компиляцию и запись программы в энергонезависимую память сервопривода (рис.68). Далее пользователь может выполнить запуск программы на выполнение, кнопка  (рис. 69, табл. 12). ПЛК автоматически загружает указанную программу из памяти и, таким образом, готов работать автономно.

В энергонезависимой памяти контроллера размещено 8 банков программ (рис. 69), в которые пользователь может сохранять разработанные программы движения. При этом в процессе отработки при необходимости ПЛК может переходить от выполнения одной программы к другой.

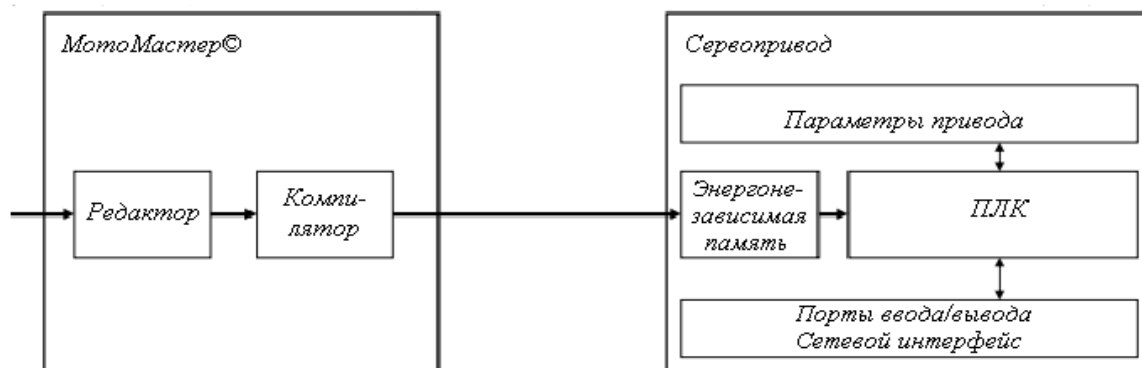


Рис. 68. Взаимодействие *МотоМастер*© и привода при программировании ПЛК

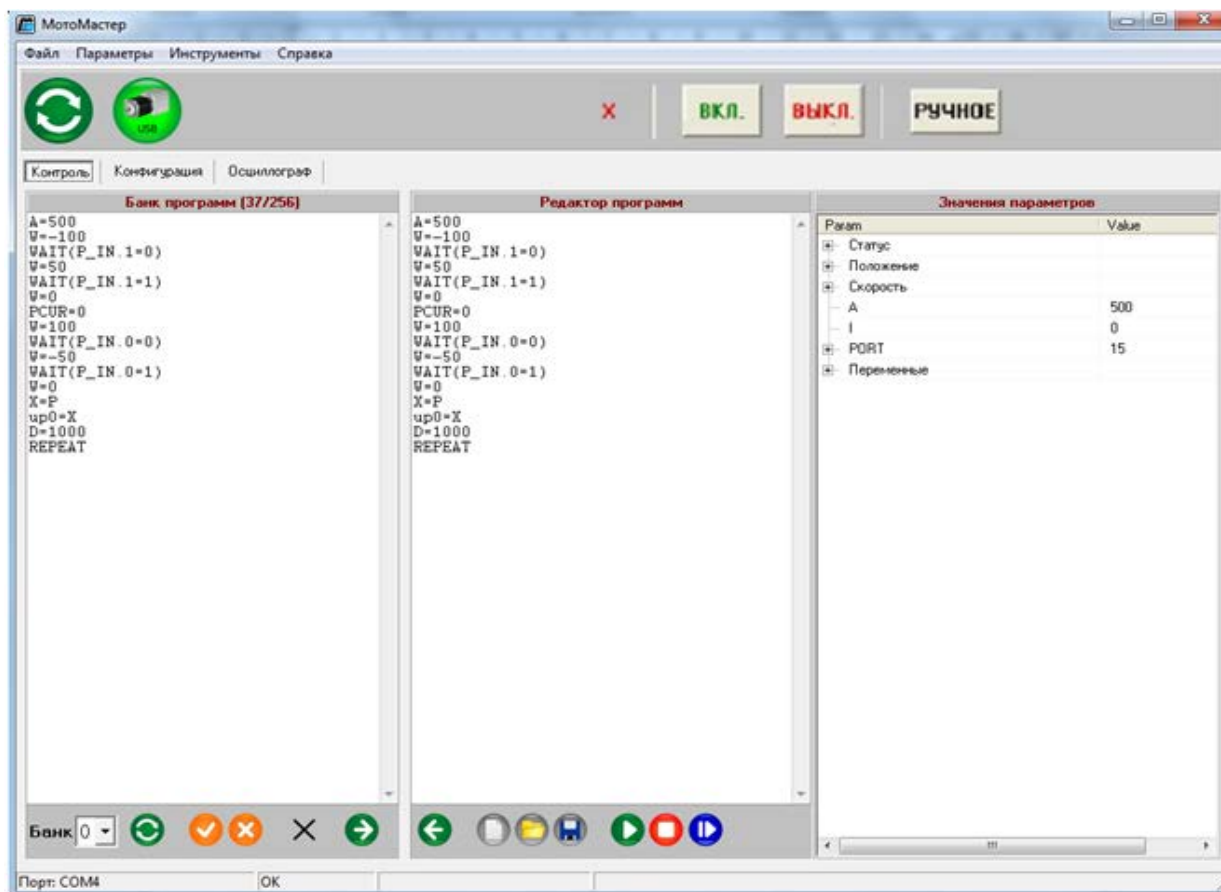


Рис. 69. Окно программирования ПЛК

После выбора вкладки «Контроль» осуществляется переход в режим программирования контроллера и открывается «Окно программирования контроллера» (см. рис. 69).

Данная вкладка состоит из двух основных частей: панель просмотра содержимого текущего банка программ контроллера (левое) и панель редактирования программ (правое).

При выборе номера банка из выпадающего списка в поле просмотра будет отображена программа, хранящаяся в соответствующем банке. Элементы управления окна программирования приведены в табл. 12.

ПЛК привода работает в фоновом режиме и прерывается такими задачами реального времени, как расчет контуров тока, скорости, позиции, прием данных по интерфейсам и пр. Поэтому частота обработки программы зависит от загруженности процессора.

При стандартных настройках привода время выполнения одной команды программы в ПЛК составляет в среднем 50 мкс. Временные характеристики ПЛК в конкретном приложении привода можно проанализировать с помощью параметров *dd15* («Время выполнения одной команды интерпретатором»), *dd16* («Время выполнения программы интерпретатором»). Параметры можно анализировать как в режиме реального времени для оценки средних величин, так и в виде графиков, используя для этого осциллограф.

Таблица 12. Сводная таблица элементов управления окна программирования

Элемент управления	Описание
	Обновление содержимого текущего банка контроллера. <i>МотоМастер</i> © выполняет чтение выбранного банка программ из привода
	Удаление программы из текущего банка контроллера
	Установка банка программ для запуска по включению привода. При этом после каждого включения привод будет обрабатывать программу, сохраненную в данном банке
	Редактирование программы из текущего банка контроллера. <i>МотоМастер</i> © выполняет перемещение программы в поле редактирования
	Запись отредактированной программы в текущий банк контроллера

Элемент управления	Описание
	Очистить поле редактирования для создания новой программы
	Загрузить программу контроллера с диска
	Сохранить программу из текущей панели редактирования программ
	Выполнить текущую команду программы. Пошаговый режим выполнения программы
	Запустить текущую программу в непрерывном режиме
	Прервать выполнение программы по завершению выполнения текущей операции

Для редактирования программы используйте клавишу , при этом программа будет скопирована в правое поле, или загрузите существующую программу с диска компьютера (клавиша ).

Для записи созданной программы в контроллер используйте клавишу . Непосредственно перед записью в контроллер записываемая программа компилируется (переводится в объектный код). Если компилятор обнаруживает ошибку, то *МотоМастер*® выдает сообщение с указанием первой инструкции с ошибкой. При этом первая строка, содержащая ошибку, подсвечивается, и запись в контроллер прерывается. В случае успешной компиляции *МотоМастер*® выполнит запись программы в текущий банк контроллера и отобразит данную программу в панели просмотра.

В контроллере существуют два режима выполнения программ: непрерывный и пошаговый. Для запуска программы в непрерывном режиме нажмите кнопку . Для запуска программы в пошаговом режиме используйте клавишу . В пошаговом режиме после отработки команды выполнение программы приостанавливается до повторного нажатия клавиши , при этом подсвечивается текущая строка программы.

В поле «Значения параметров» в пошаговом режиме отображаются текущие значения положения, скорости, ускорения и состояние цифровых входов/выходов на момент завершения выполнения команды. При необходимости текущие значения можно обновить путем нажатия кнопки «Обновить».

Чтобы прервать выполнение программы в любом режиме, используйте клавишу .

После разработки программы рекомендуется сохранять программу на диск компьютера с целью возможности восстановления программ после потенциальной потери данных энергонезависимой памяти. Такая ситуация возможна при выходе двигателя из строя, при импорте параметров привода.

4.4.1.5. Экспорт/импорт параметров

В программе *МотоМастер*® реализована возможность сохранения всех параметров сервопривода в файл и загрузки значений параметров из файла. Данный функционал предназначен для поиска неисправностей и некорректной настройки в случае обращения в службу технической поддержки.

Кроме того, рекомендуется выполнять экспорт настроек привода с целью их последующего восстановления при возникновении сбоев, а также для дублирования аналогичных настроек в другие сервоприводы.

Для сохранения параметров в файл выберите из меню (рис. 69) пункт «Файл/Экспорт параметров» [17]. В появившемся диалоговом окне введите имя файла и нажмите кнопку «Сохранить». При этом будут сохранены текущие значения всех параметров привода, включая программы всех банков программ. После окончания сохранения работа программы *МотоМастер*® продолжается в нормальном режиме.

Для загрузки параметров из файла выберите из меню пункт «Файл/Импорт параметров». В появившемся диалоговом окне выберите файл параметров и используйте клавишу «Открыть».

ВНИМАНИЕ! Настоятельно не рекомендуется вручную вносить изменения в сохраненные файлы параметров.

4.4.1.6. Обновление управляющей программы

Данная функция используется для записи новых версий управляющей программы в контроллер. Для обновления программы выберите из меню (рис. 69) пункт «Инструменты > Прошивка контроллера» [17]. Отобразится окно программатора.

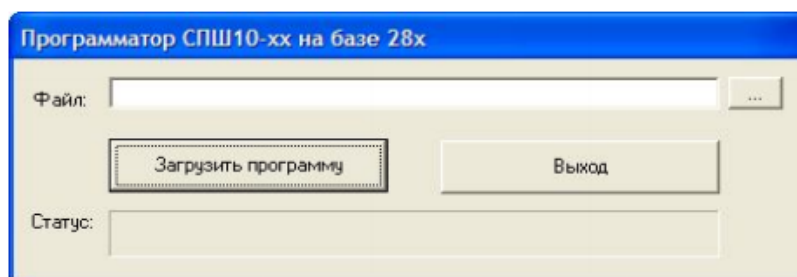


Рис. 70. Диалоговое окно программатора

Нажмите кнопку «Загрузить программу» и подождите окончания процедуры. При этом в поле «Статус» будет отображаться текущий этап загрузки.

По завершению программирования выполните сброс контроллера (сброс напряжения питания).

ВНИМАНИЕ! При возникновении сбоев в процессе записи нового программного обеспечения контроллера потребуется обновление программы в сервисном центре, поэтому перед началом программирования завершите все приложения на компьютере, убедитесь в стабильности питания контроллера и компьютера. Не прерывайте программу до полного завершения записи.

ВНИМАНИЕ! Новая прошивка сохраняется в энергонезависимой памяти контроллера, которая имеет ограниченное число циклов записи. Допускается не более 500 циклов программирования. Текущее количество выполненных записей фиксируется в параметре *ss7*.

4.5. Параметры сервоприводов СПС25 и СПШ

Для настройки параметров системы управления сервоприводом [15] используется программа *МотоМастер*© [17].

Для выполнения настройки параметров необходимо:

- подключить сервопривод к компьютеру через интерфейс *USB*;
- подать напряжение питания;
- запустить *МотоМастер*©;
- подключиться к требуемому двигателю;
- перейти в раздел «Конфигурация».

При изменении параметров *МотоМастер*© пересылает обновление в систему управления, где они записываются в энергонезависимую память данных. Поэтому внесенные изменения восстанавливаются после сброса контроллера.

Все параметры сервопривода разбиты на несколько групп:

- статические параметры;
- параметры управления;
- динамические параметры;
- системные параметры (предназначены для настройки внутренних алгоритмов и режимов работы, а также для выполнения проверки работоспособности и выявления неисправностей);
- параметры тестирования (позволяют задать режим тестирования качества настройки привода).

Некоторые параметры доступны только для чтения, поэтому при попытке изменить их значение *МотоМастер*© выдаст соответствующее сообщение-предупреждение.

Программа *МотоМастер*© выполняет пересчет параметров «скорость» и «ток» во внутренний формат при записи в привод и при отображении значения в окне программы для удобства пользования программой. Формула пересчета скорости при чтении из привода:

$$\omega \text{ (об / мин)} = \text{round} \left(\frac{\omega(\text{дискрет}) \cdot 60 \cdot vp4}{st1 \cdot vp3} \right),$$

где описания и значения параметров *vp3*, *vp4*, *st1* представлены в табл. 13.

Формула пересчета скорости при записи в привод:

$$\omega \text{ (дискрет)} = \frac{\omega(\text{об / мин}) \cdot st1 \cdot vp3}{60 \cdot vp4}.$$

Формула пересчета тока при чтении из привода:

$$I(A) = \frac{I(\text{дискрет}) \cdot 5}{2047}.$$

Формула пересчета тока при записи в привод:

$$I(\text{дискрет}) = \frac{I(A) \cdot 2047}{5}.$$

ВНИМАНИЕ! При пересчете, в процессе округления, некоторые параметры могут принимать значения, отличные на некоторую величину от заданных пользователем значений в программе *МотоМастер*®. При этом погрешность установки зависит от настроек контуров управления.

В табл. 13–18 приводится перечень параметров, используемых при выполнении лабораторных работ, их полный перечень приведен в литературе [16].

4.5.1. Статические параметры

В данную группу входят *неизменяемые* в процессе работы параметры привода.

Таблица 13. Статические параметры сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение	Значение по умолчанию
Контур тока (момента)				
<i>Ср1</i>	Пропорциональный коэффициент контура тока (момента)	1	25	2
<i>Ср2</i>	Интегральный коэффициент контура тока (момента)	0	100	0
<i>Ср3</i>	Номинальный ток, А	0	3	3
<i>Ср4</i>	Максимальный ток, А (определяет пиковое значение тока, причем данное значение тока может подаваться на двигатель в течение 5 мс, по истечении которых ток в обмотке двигателя ограничивается номинальным током в течение 50 мс)	0	5	4
<i>Ср5</i>	Состояние контура тока (параметр определяет, используется ли замкнутое регулирование тока)	–	–	замкнут
<i>Ср6</i>	Вырабатываемый момент, %	0	100	100
<i>Ср7</i>	Модуляция ШИМ-сигнала	0:выкл	1:вкл	1:вкл
Контур скорости				
<i>Vp1</i>	Пропорциональный коэффициент контура скорости	0.00025	150	0.6
<i>Vp2</i>	Интегральный коэффициент контура скорости	0.00025	150	0.3
<i>Vp16</i>	Дифференциальный коэффициент контура скорости	0.00025	150	1.0
<i>Vp3</i>	Коэффициент обратной связи по скорости	1	500	1
<i>Vp4</i>	Частота дискретизации контура скорости, Гц (при увеличении частоты дискретизации увеличивается жесткость системы и уменьшается глубина регулирования, т.е. увеличивается неравномерность вращения; после настройки параметра <i>Vp4</i> могут быть изменены параметры <i>Vp3</i> , <i>Vp5</i> , <i>Vp6</i> , <i>Vp8</i> , <i>Vp9</i>)	100	5000	500
<i>Vp5</i>	Ускорение/замедление, дискрет/с (данный параметр настраивает внутренний интерполятор скорости)	1	15000	100
<i>Vp6</i>	Максимальное время выхода на номинальный режим, с (время, в течение которого скорость вала двигателя должна достигнуть заданного значения; если скорость вала не достигла заданного значения, то происходит аварийный останов привода. При этом состояние привода переводится в «Останов по перегрузке»)	0:не ограничено	30	5
<i>Vp7</i>	Состояние контура скорости (параметр определяет, используется ли замкнутое регулирование скорости)	–	–	замкнут
<i>Vp8</i>	Максимальная скорость вращения, об/мин	10	7500	4000
<i>Vp9</i>	Динамический режим (1. Режим плавного разгона/торможения. В данном состоянии внутренний интерполятор включен. 2. Режим с максимальной динамикой – без использования внутреннего интерполятора. Вал двигателя выполняет разгон с максимальным ускорением. Данный режим используется, если привод работает под управлением системы управления верхнего уровня, которая реализует интерполяцию)	0	4	1

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение	Значение по умолчанию
<i>Vp14</i>	Номинальная скорость, об/мин (определяет характеристики блока управления. Номинальная скорость вращения двигателя зависит от величины силового напряжения питания и параметров <i>Cr1-Cr4</i> настройки контура тока [Описание параметров]. Если текущая скорость вращения превышает значение <i>Vp14</i> , то включается алгоритм компенсации противо-ЭДС, что позволяет достичь высоких скоростей вращения вала двигателя)	0	500	–
<i>Vp15</i>	Авторасчет номинальной скорости, об/мин (если параметр <i>Vp15</i> установлен в «Да» в момент включения, блок управления выполняет автоматическое определение номинальной скорости в соответствии с текущим уровнем напряжения и параметрами привода. Пользователь может устанавливать номинальную скорость вращения вручную после установки параметра <i>Vp15</i> в «Нет»)	0:Нет	1:Да	–
Контур положения				
<i>Pp1</i>	Пропорциональный коэффициент контура положения	0.00025	100	5
<i>Pp2</i>	Интегральный коэффициент контура положения	0.00025	3000	0
<i>Pp3</i>	Частота дискретизации контура положения, Гц (предусмотрено несколько частот дискретизации, из которых пользователь может выбрать требуемую частоту дискретизации в зависимости от стоящей перед ним задачи)	50	500	500
<i>Pp5</i>	Состояние контура положения (параметр определяет, используется или нет режим позиционирования)	–	–	замкнут
<i>Pp6</i>	Ограничение интегральной составляющей контура позиции (параметр насыщения интегрирования ПИ регулятора скорости. Позволяет эффективно снижать колебательности переходного процесса по позиции)	0	10	0.5
<i>St1</i>	Разрешение датчика позиции на один оборот, имп. (параметр только для чтения)	4000	160000	4000
<i>IpO*</i>	Источник задающего воздействия (определяет интерфейс, по которому выполняется управление приводом)	–	–	0
<i>Ep1*</i>	Режим торможения	–	–	–
<i>Ep2*</i>	Максимальное напряжение	0	215	–

*Список возможных интерфейсов: 0:Интерфейс *USB*; 2:Интерфейс *StepDir*; 4:Аналоговый интерфейс; 5:Интерфейс *CAN*; 6:Квадратурный интерфейс.

USB интерфейс является технологическим и предназначен для настройки, программирования и анализа работы привода.

StepDir и квадратурный интерфейсы предназначен для управления текущей позицией. При использовании данных интерфейсов контуры скорости и позиции должны быть замкнуты.

Аналоговый интерфейс предназначен для управления текущей скоростью вращения или текущим моментом. Для управления скоростью вращения необходимо разомкнуть контур позиции и замкнуть контур скорости. Для управления моментом необходимо разомкнуть контур скорости и контур позиции.

CAN-интерфейс предоставляет полный доступ ко всем ресурсам привода и позволяет управлять любым из параметров управления.

**Сервопривод при резком торможении переходит в генераторный режим. При этом привод вырабатывает противо-ЭДС, что приводит к повышению уровня силового напряжения питания и может повредить привод и внешнее оборудование. Традиционно данная задача решается с помощью тормозных резисторов, которые должны рассеивать вырабатываемую приводом энергию. Используемые приводы оснащены датчиком напряжения и имеют возможность контролировать его значение. Для этого нужно выбрать один из режимов торможения:

1. Торможение без контроля напряжения. В данном режиме при превышении уровня напряжения, заданного параметром *ep2*, привод прекращает генерацию ШИМ-сигнала и устанавливает статус (параметр *dd11*) в состояние «Силовое напряжение превышает напряжение, установленное пользователем».

2. Торможение с контролем напряжения. В данном режиме при превышении уровня напряжения, заданного параметром *ep2*, привод прекращает генерацию ШИМ-сигнала. При возврате напряжения в безопасный

диапазон привод возобновляет управление. Таким образом обеспечивается безопасный уровень напряжения с сохранением работоспособности привода.

4.5.2. Параметры управления

При выполнении лабораторных работ с помощью данных параметров задают текущее управление (табл. 14) [16].

Таблица 14. Параметры управления сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение	По умолчанию
<i>Ct1</i>	Задание контура тока, А (устанавливает задающее воздействие для контура тока; параметр может использоваться только, если разомкнуты контуры скорости и положения)	–4	4	0
<i>Ct12</i>	Задание контура скорости, об/мин (устанавливает задающее воздействие для контура скорости; параметр может использоваться только, если разомкнут контур положения)	–7000	7000	0
<i>Ct13</i>	Задание контура позиции, имп. (устанавливает задающее воздействие для контура положения)	–2147483647	+2147483647	0

4.5.3. Динамические параметры

Данные параметры отображают текущее состояние привода и используются *только для просмотра* (табл. 15) [16].

Таблица 15. Динамические параметры сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
<i>Dd1</i>	Текущий ток в обмотке 1, А	–5	+5
<i>Dd3</i>	Текущий ток в обмотке 2, А	–5	+5
<i>Dd2</i>	Текущее заданное значение контура тока, А	–5	+5
<i>Dd4</i>	Текущая скорость вращения, об/мин	–7000	+7000
<i>Dd5</i>	Заданная скорость вращения, об/мин	–7000	+7000
<i>dd21</i>	Ошибка контура скорости, об/мин	–7000	+7000
<i>Dd7</i>	Текущая позиция, дискрет	–2147483647	+2147483647
<i>Dd8</i>	Заданная позиция, дискрет	–2147483647	+2147483647
<i>dd19</i>	Ошибка контура позиции, дискрет	–2147483647	+2147483647
<i>Dd10</i>	Температура внутри корпуса, град	–40	+100
<i>Dd11</i>	Статус контроллера (0:«исправен»;... 4:«выход из температурного диапазона»;... 8:«низкое цифровое напряжение» – проверьте, что цифровое напряжение питания находится в диапазоне 12–15 В; подробнее в литературе [описание параметров])	0	9
<i>Dd12</i>	Текущее значение силового напряжения, В (отображает текущее измеренное значение силового напряжения питания)	0	150
<i>Dd13</i>	Текущее значение цифрового напряжения, В (отображает текущее измеренное значение цифрового напряжения питания; это значение должно быть в пределах 12–17 В)	0	15
<i>Dd15</i>	Время выполнения команды интерпретатором (определяет максимальное время, которое интерпретатор затрачивает на выполнение команды в текущей программе, имеет действительное значение только после запуска программы)	–	–
<i>Dd16</i>	Время выполнения программы интерпретатором (определяет максимальное время, которое интерпретатор затрачивает на выполнение всей программы)		

4.5.4. Системные параметры

Предназначены для настройки внутренних алгоритмов и режимов работы, а также для выполнения проверки работоспособности и выявления неисправностей, используются *только для просмотра* (табл. 16) [16].

Таблица 16. Системные параметры сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
Ss2	Количество коротких замыканий	0	65536
Ss3	Количество превышений температуры	0	65536
Ss4	Количество перенапряжений	0	65536
Ss5	Количество пониженного значения напряжений	0	65536
Ss6	Количество перегрузок	0	65536
Ss7	Количество перепрограммирований (<i>DSP</i> контроллер имеет ограниченное число циклов перепрограммирований. Гарантированное число программирований составляет 500)	0	65536
Ss8-Ss15	Журнал последних 8 событий (в журнал сохраняются последние 8 аварийных событий, которые были зафиксированы)	—	—

Ss2 – Ss6 – счетчики событий за время эксплуатации привода. При возникновении аварийных событий происходит увеличение значения соответствующего счетчика на 1.

ВНИМАНИЕ! Отключение двигателя по данным событиям не является штатным режимом работы, примите меры по устранению условий возникновения данного события.

4.5.5. Параметры тестирования

Сервоприводы СПШ и СПС поддерживают тестовый режим, с помощью которого можно проанализировать качество переходных процессов в приводе [16]. Эксперимент проводится следующим образом:

1. Пользователь настраивает параметры теста.
2. Далее настраивает осциллограф и выполняет запуск эксперимента.
3. Сервопривод отрабатывает эксперимент и сохраняет 1500 выборок каждого параметра (не более трех) с заданным интервалом.
4. Сервопривод передает сохраненные значения в *МотоМастер*©.

Таблица 17. Параметры тестирования сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
<i>Tr1</i>	Режим осциллографа (задает текущий тестовый режим: 1) непрерывный режим – режим непрерывного сканирования заданных координат; 2) ступенька – приращение позиции на заданный шаг; 3) синус – синусоидальное изменение позиции с заданными параметрами; 4) приращение скорости; 5) синусоидальное изменение скорости; 6) параболическое изменение скорости; 7) измерение без задания – в данном режиме задающее воздействие не вносится, происходит лишь сканирование требуемых координат в течение определенного времени	0	7
<i>Tr2</i>	Период опроса, мкс (параметр определяет, с какой частотой будет выполняться опрос требуемых параметров; длительность всего эксперимента составляет <i>Tr2</i> ·3000 мкс)	25	25000
<i>Tr3</i>	Амплитуда задания положения, дискрет (если параметр <i>Tr1</i> = Ступенька/Приращение скорости, то <i>Tr3</i> определяет приращение, которое будет добавлено к текущей позиции в момент проведения теста. Если параметр <i>Tr1</i> = Синус/Синусоидальное изменение скорости, то <i>Tr3</i> определяет амплитуду синусоидального задания контура позиции)	–2147483647	+2147483647
<i>Tr6</i>	Амплитуда задания скорости, дискрет (если параметр <i>Tr1</i> = Ступенька/Приращение скорости, то <i>Tr6</i> определяет приращение, которое будет добавлено к текущей скорости в момент проведения теста. Если параметр <i>Tr1</i> = Синус/ Синусоидальное изменение скорости, то <i>Tr6</i> определяет амплитуду синусоидального задания контура скорости)	–14000	+14000
<i>Tr5</i>	Период задающего воздействия, мкс (если параметр <i>Tr1</i> = Ступенька/Приращение скорости, то <i>Tr5</i> определяет время после начала эксперимента, через которое будет выполнено приращение задающего воздействия. Если параметр <i>Tr1</i> = Синус/Синусоидальное изменение скорости, то <i>Tr5</i> определяет период синусоидального задания контура позиции/скорости)	25	25000

4.5.6. Пользовательские параметры

Данные параметры используются *только для просмотра* (табл. 18) [16].

Таблица 18. Пользовательские параметра сервоприводов

Имя параметра	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
<i>up0 – up7</i>	Переменные общего назначения (могут использоваться произвольно пользователем для хранения технологической информации)	–2147483647	+2147483647
<i>X, Y, Z</i>	Переменные, использующиеся во внутреннем программируемом логическом контроллере привода	–2147483647	+2147483647

5. Разработка программ на языке SML

В текущей версии редактора программ *МотоМастер*© [37] существует ряд ограничений:

- не допускаются пустые строки в программе, в том числе и последняя;
- не допускаются лишние пробелы и символы табуляции внутри команд;
- все команды чувствительны к регистру;
- размер каждой программы (в объектном коде) не может превышать 256 слов.

5.1. Обозначения, форматы данных и функции [37]

5.1.1. Обозначения

В языке SML используется ряд символических обозначений, описание которых приведено в данном разделе.

<Константа> – целочисленное знаковое число.

Все константы могут быть введены в десятичном или шестнадцатеричном форматах.

Формат представления десятичных чисел: 1; 15; 256.

Формат представления дробных чисел: 123.1; 0.0012; -0.1. Для разделения целой и дробной частей допускается использовать только точку.

Формат представления шестнадцатеричных чисел: 0xx1; 00xF; 0xFF (x – любое из значений от 0 до F).

Максимальный диапазон констант от -2^{31} до $2^{31}-1$.

Пример использования констант: X=10; Y=0D0A.

<Константа IQ12> – дробное число в формате IQ12 (см. ниже).

<Переменная>. При написании программ пользователю доступны 3 переменных общего назначения: X, Y, Z. Переменная содержит 32-битное знаковое значение или целочисленное, или дробное, хранящееся в формате IQ12. Все переменные обнуляются при загрузке программы на выполнение.

<Параметр> – символическое обозначение параметра привода. В программе пользователя ПЛК доступны все параметры привода, которые представлены в дереве конфигурации *МотоМастера* © [Интегрированный сервопривод серии СПШ и СПС. Описание пар-ов. Версия 5.1]. Переменные доступны как на чтение, так и на запись. Запрет на запись имеется для переменных, имеющих атрибут только на чтение. Работу с параметрами необходимо выполнять в соответствии с их форматом. Значения некоторых параметров привода хранятся в формате с фиксированной точкой, например, параметр dd1 «Ток в обмотке 1» хранится в формате IQ12.

Формат хранения параметров описан в документе «Интегрированный сервопривод серии СПШ и СПС. Описание пар-ов. Версия 5.1». Обращение к переменным выполняется по имени, указанному в дереве конфигурации *МотоМастера*©.

Например: ip0=4; X=ip1; Z=ip0+X.

<Операнд> – используется для обозначения любой записи из списка: *<Константа>*, *<Переменная>*.

<Операция> – символ, обозначающий арифметическую или логическую операцию *только* для целочисленных значений, а именно, + (Сумма), – (Вычитание), / (Деление), * (Умножение), & (Логическое побитовое ‘И’), | (Логическое побитовое ‘ИЛИ’).

Например, по тексту программы могут встречаться следующие операции: X=Z/2; Z=Y*X; Y=Y&X.

Для чисел в формате IQ12 используются специальные функции (см. ниже).

<Выражение> используется для обозначения произвольного сочетания переменных, констант и операций. Запись типа X=*<Выражение>*, которая может встречаться по тексту, может означать, например, одно из следующих выражений: X=Y; X=Y&0x0F; X=X&Y; X=ip0&Y; ip1=Y/10; X=15.

В выражениях может использоваться не более одной операции (запись типа $X=X&Y&Z$ недопустима) и не более одного параметра (записи типа $X=ip0+ip1$; $ip0=ip1$ недопустимы).

Если в выражении присутствует операция, то выражение может начинаться только с переменной или параметра: запись типа $X=0/Z$ недопустима.

<Условие>. Используется в условных операциях, циклических операциях, операциях ожидания и пр.

<Выражение>=<Переменная>. Условие истинно, если <Выражение> равно <Переменная>.

<Выражение><<Переменная>. Условие истинно, если <Выражение> меньше <Переменная>.

<Выражение>><Переменная>. Условие истинно, если <Выражение> больше <Переменная>.

<Выражение>!<Переменная>. Условие истинно, если <Выражение> не равно <Переменная>.

<Выражение>=<Константа>. Условие истинно, если <Выражение> равно <Константа>.

<Выражение><<Константа>. Условие истинно, если <Выражение> меньше <Константа>.

<Выражение>><Константа>. Условие истинно, если <Выражение> больше <Константа>.

<Выражение>!<Константа>. Условие истинно, если <Выражение> не равно <Константа>.

ОГРАНИЧЕНИЯ: в качестве операций в условии не могут использоваться * и / .

5.1.2. Форматы данных и их преобразование

В ПЛК приводов серий СПШ/СПС поддерживаются операции как с целыми, так и с дробными числами. При этом используется формат дробного числа с фиксированной точкой *IQ12*.

Дробные числа представляются в виде знакового 32-битного значения. Дробная часть числа в формате *IQ12* занимает младшие 12 бит (число 4096). Например, дробное число 2.5 в формате *IQ12* будет выглядеть как $2.5 \cdot 4096 = 10240$.

Компилятор ПЛК не следит за типами переменных. Пользователь должен быть внимательным при использовании разных форматов чисел, используемых при программировании.

Для преобразования форматов из целочисленного в дробный и наоборот используются функции *iq*, *vartoiq*, *vartoint*.

Функция преобразования дробного числа, представленного в виде константы, в формат *IQ12*:

$iq12(<Константа>)$.

Например, преобразовать дробное число 1.5 в формат *IQ12* и записать результат в переменную общего назначения *X*

$X=iq12(1.5)$.

В результате $X = 1.5 \cdot 4096 = 6144$.

Функция преобразования целочисленного значения, хранящегося в переменной *X*, в формат *IQ12*:

$\#vartoiq(X)$.

Например, преобразовать переменную $X=10$ из целочисленного значения в дробное в формате *IQ12*

$X=\#vartoiq(X)$.

В результате $X = 10 \cdot 4096 = 40960$.

Функция преобразования дробного числа, хранящегося в переменной *X* в формате *IQ12* ($X = 40960$), в целое число:

$\#vartoint(X)$.

Например, преобразовать переменную *X* из дробного *IQ12* ($X = 40960$) в целое число

$X=\#vartoint(X)$.

В результате $X = 40960/4096 = 10$.

Функция **#frac** – выделение дробной части числа, хранящегося в переменной в формате *IQ12*:

$<Переменная> = \#vartoint(<Переменная>)$.

Например, переменная *Y* будет содержать значение 0.5 после выполнения следующего фрагмента программы:

$X=iq12(1.5)$

$Y=\#frac(X)$.

Для выполнения арифметических операций умножения и деления двух чисел в формате IQ12 используются функции **#mpy** и **#div** соответственно:

<Переменная>=#mpy(<Переменная>,<Переменная>)

<Переменная>=#div(<Переменная>,<Переменная>)

Пример фрагмента программы работы с функцией **#mpy**:

X=iq12(1.5)	
Y=\$analog_inputA	<i>Считывание аналогового входа</i>
Y=#vartoiq(Y)	<i>Переводим в IQ12</i>
Y=# mpy(Y, X)	<i>Масштабирование переменной Y</i>

5.1.3. Функции извлечения квадратного корня, тригонометрические и работы со стеком

Функция **#sqrt** выполняет извлечение квадратного корня переменной в формате IQ12:

<Переменная>=# sqrt(<Переменная>)

Функция **#mag** выполняет извлечение квадратного корня суммы переменных, предварительно возведя их в квадрат:

<Переменная>=# mag(<Переменная>,<Переменная>)

Функции **#sin** и **#cos** возвращают значение sin и cos соответственно в формате IQ12 в диапазоне от 0.0 до 1.0. Их формат:

<Переменная>=#sin(<Переменная>)

<Переменная>=#cos(<Переменная>)

Пример программы вычисления sin

P=#sin(X)	
X=X+1	
REPEAT	<i>Повторить</i>

Функция **#atan** возвращает значение arctan в формате IQ12 в диапазоне от 0.0 радиан до 2π радиан. Ее формат:

<Переменная>=#atan(<Переменная1>,<Переменная 2>)

Если **<Переменная1>=X**, а **<Переменная 2>=Y**, то **Arctan=(X/Y)**

Пример программы вычисления arctan:

Y=10	<i>Коэффициент масштабирования</i>
Y=#vartoiq(Y)	
P=#atan(X,Y)	
X=X+1	
REPEAT	

В ПЛК привода реализован стек для хранения 32-битных переменных. Размер стека рассчитан на 8 переменных. Схема работы стека *FIFO (First input last output)*.

Функция помещения в вершину стека:

#push(<Переменная>)

Функция извлечения переменной из вершины стека:

#pop(<Переменная>)

При переполнении стека программа будет остановлена и ПЛК привода будет переведен в состояние «Ошибка».

Помещение переменных в стек:

#push(X)
#push(Y)

Извлечение переменных из стека по схеме *FIFO*:

#pop(Y)
#pop(X)

5.2. Команды

5.2.1. Команды перехода и останова

Синтаксис команды завершения выполнения текущей программы ПЛК:

HALT

остановить выполнение программы ПЛК, при этом все установленные программой параметры (задания по положению и скорости, значения портов выхода и др.) сохраняются при дальнейшей работе.

Синтаксис команды повторного выполнения текущей программы ПЛК:

REPEAT

повторить выполнение основного тела программы с первой строки, при этом все установленные программой параметры (задания по положению и скорости, значения портов выхода) сохраняются.

Синтаксис команды перехода на выполнение программы ПЛК:

PROGRAM<Константа>,

где **<Константа>** = 0...7 – перейти на выполнение программы, хранящейся в банке. Значения переменных *X*, *Y* и *Z* при этом обнуляются.

ВНИМАНИЕ! Для корректного завершения работы ПЛК все программы должны завершаться одной из этих команд.

Для паузы в выполнении программы используется временная задержка, которая формируется командой

D=<Выражение>,

приостановить выполнение программы на заданное количество миллисекунд. Максимальный временной интервал, который может сформировать данная команда, составляет 32767 мс.

Пример использования временной задержки:

X=1000

D=up0+*X*

Сформировать задержку, время которой представляет собой сумму содержимого параметра up0 и переменной X

Z=*Z*+1

Увеличить значение переменной Z на 1

D=1

Задержка 1 мс

REPEAT

Повторить программу сначала

5.2.2. Условные и циклические операции, циклы ожидания

Условные операции предназначены для выполнения определенной части кода программы только при соблюдении определенных условий. Синтаксис команды:

IF(<Условие>)

<Действия>

ENDIF

В качестве действий могут выступать любые команды, в том числе и вложенные условные операции.

Предусмотрена также разновидность условного оператора, синтаксис которой приведен ниже:

IF(<Условие>)

<Действия 1>

ELSE

<Действия 2>

ENDIF

Отличие данной конструкции заключается в том, что если **<Условие>** верно, то выполняются **<Действия 1>**, иначе **<Действия 2>**.

Команда **WAIT** предназначена для прерывания программы до наступления определенных событий, описанных в условии цикла ожидания. Синтаксис команды:

WAIT(<Условие>)

ВНИМАНИЕ! Не следует использовать команду **WAIT** в обработчиках событий, описание которых приведено в п. «События».

Синтаксис команды, предназначенной для выполнения циклических операций при соблюдении указанного условия, представлен ниже:

**WHILE(<Условие>
<Действия>
ENDWHILE**

Допускается использование вложенных циклов.

Функция ABS может использоваться *только в условных операциях* для получения значения числа без учета его знака. Синтаксис функции:

*ABS(<Выражение>) = <Операнд>
ABS(<Выражение>) ><Операнд>
ABS(<Выражение>) <<Операнд>
ABS(<Выражение>) != <Операнд>*

5.2.3. Управление портами ввода-вывода

Программам пользователя доступны цифровые порты ввода-вывода, выведенные на разъем привода, описанного в таблице «Разъем дискретного входа/выхода» в документах [17; 30].

Синтаксис команды установки цифровых выходов:

P_OUT.n=<Константа>,

где *n* может принимать значения 0 или 1.

Синтаксис чтения портов ввода:

<Переменная>=PORT

При этом в переменную будут считаны 4 младших бита данных, начиная с 0-го в соответствии с номером портов ввода разъема, описание которого приведено в таблице «Разъем дискретного входа/выхода» в документах [17; 30].

Операнд *PORT* может также использоваться в условных операциях.

Порты ввода могут использоваться индивидуально в условных операторах, при этом синтаксис обращения к порту ввода показан ниже:

P_IN.n,

где *n* может принимать значения 0, 1, 2 или 3.

Для исключения эффекта «дребезга контактов» (влияния шумов) на обработку входных сигналов драйвер портов ввода после изменения сигнала на входе каждого порта не опрашивает порт в течение 3 мс, что позволяет эффективно бороться с переходными процессами на портах при переключении между логическими состояниями. Если данного алгоритма недостаточно для исключения шума на портах ввода, то можно установить внешний фильтр, например в виде RC-цепи, или выполнить фильтрацию сигнала программно.

ПРИМЕЧАНИЕ: *P_IN.n* и *P_OUT.n* не могут быть использованы в выражениях.

Ниже приведены примеры программ работы с портами ввода-вывода с использованием команд условных операций и операции ожидания (*Программы 1 и 2*), с использованием циклических операций (*Программа 3*).

Программа 1

<i>X=PORT&2</i>	Считать значение порта 1 в переменную <i>X</i>
<i>IF(X!=0)</i>	Если значение порта не равно нулю, то
<i>P_OUT.0=0</i>	Выставить порт вывода 0 в состояние логического нуля
<i>HALT</i>	Остановить выполнение программы
<i>ELSE</i>	Иначе
<i>P_OUT.0=1</i>	Выставить значение порта вывода 0 в состояние логической единицы
<i>ENDIF</i>	
<i>IF(P_IN.0!=0)</i>	Если значение порта 0 не равно нулю, то
<i>P_OUT.1=1</i>	Выставим значение порта вывода 1 в состояние логической единицы
<i>WAIT(P_IN.0=1)</i>	Цикл ожидания возврата порта ввода 0 в состояние логической единицы и
<i>P_OUT.1=0</i>	Обнулим порт вывода 1

ENDIF	
REPEAT	Повторить программу с начала
 <i>Программа 2</i>	
IF (P_IN.0=0)	Если значение порта 0 установлено в 0, то
IF (dd11=0)	Вложенный цикл, если параметр dd11=0, то
P_OUT.0=0	Выставить значение порта 0 в значение 0 и
HALT	приостановить программу
ELSE	Иначе
P_OUT.0=1	Выставить значение порта 0 в значение 1
ENDIF	Конец вложенного цикла
ELSE	Иначе
WAIT (P=X)	Ожидание достижения позиции значения переменной X
X=X+4000	
P=X	Установить новое значение контура позиции
ENDIF	
REPEAT	Повторить программу с начала

Программа 3

X=10	
WHILE (X>0)	Цикл приёма 10 импульсов с порта 0
WAIT (P_IN.0=1)	
WAIT (P_IN.0=0)	
X=X-1	
ENDWHILE	
P=P+4000	Выполнить перемещение на 4000 импульсов
D=1000	
REPEAT	Повторить программу с начала

5.2.4. Управление движением

При управлении движением в языке *SML* предусмотрены различные варианты управления позицией, скоростью и ускорением.

5.2.4.1. Варианты управления позицией, скоростью и ускорением

Управление позицией

Вариант 1. Синтаксис команды «Установить задание контура позиции»:

P=<Выражение>.

Скорость движения будет ограничена параметром *vr8* (максимальная скорость вращения).

Вариант 2. Синтаксис команды «Установить задание контура позиции и ограничить скорость»:

P=<Операнд>,W=<Операнд>.

Команда изменяет значение параметра *vr8*. Как для варианта 1, так и для варианта 2 ускорение будет зависеть от параметра *vr9*.

Динамический режим определяется следующими правилами:

- *vr9=режим с максимальной динамикой*, привод выполняет разгон до номинальной скорости с максимально возможным ускорением,
- *vr9=режим плавного разгона/торможения*, привод выполняет разгон до номинальной скорости с ускорением, заданным параметром *vr5* (ускорение).

Вариант 3. Синтаксис команды «Установить задание контура позиции, ограничить скорость и ограничить ускорение»:

P=<Операнд>,W=<Операнд>,A=<Операнд>.

При этом ускорение будет ограничено, только если контур скорости работает в режиме плавного разгона. Команда изменяет значение параметров *vr5*, *vr8*. При выполнении команд управления позицией автоматически замыкается контур позиции независимо от состояния параметра *pr5* (состояние контура позиции).

Задание позиции выполняется асинхронно, т.е. программа продолжает свое выполнение, не дожидаясь окончания перемещения.

Управление скоростью

Вариант 1. Синтаксис команды «Установить задание скорости»:

$W=<Выражение>$.

При этом ускорение будет задаваться как описано в предыдущем пункте «Управление позицией».

При выполнении команды автоматически замыкается контур скорости и размыкается контур позиции.

Вариант 2. Синтаксис команды «Установить задание скорости и задать требуемое ускорение»:

$W=<Операнд>$, $A=<Операнд>$.

При этом скорость будет ограничена значением параметра $vr8$. Команда изменяет значение параметра $vr5$. Ускорение будет ограничено, только если контур скорости работает в режиме плавного разгона.

При выполнении данной команды ПЛК автоматически размыкает контур позиции и замыкает контур скорости, поэтому привод выполнит задание независимо от состояния параметров $pr5$ (состояние контура позиции) и $vr7$ (состояние контура скорости).

Управление ускорением

Синтаксис команды «Установить ускорение»:

$A=<Выражение>$.

Команда изменяет значение параметра $vr5$.

ВНИМАНИЕ!

1. Не используйте команды управления положением, если контур положения разомкнут и вал двигателя вращается. Это приведет к резким переходным процессам по скорости, т.к. команды управления позицией автоматически замыкают контур позиции.

2. Не используйте команды управления скоростью, если контур положения замкнут и вал двигателя вращается. Это приведет к резким переходным процессам по скорости, т.к. команды управления позицией автоматически размыкают контур позиции.

Ниже приведены программы управления движением (*Программа 4*), заданием позиции с ограничением скорости и ускорения (*Программа 5*).

Программа 4

$X=1000$	Инициализация переменной
$Y=100$	Инициализация переменной
$W=X, A=Y$	Задание скорости вращения и ускорения
$X=X-100$	
$WAIT(W>X)$	Ожидание выхода на требуемую скорость
$W=0$	Прекратить вращение
$WAIT(W<5)$	Ожидание завершения вращения
$REPEAT$	Повторить программу с начала

Результат отработки программы представлен на рис. 71.

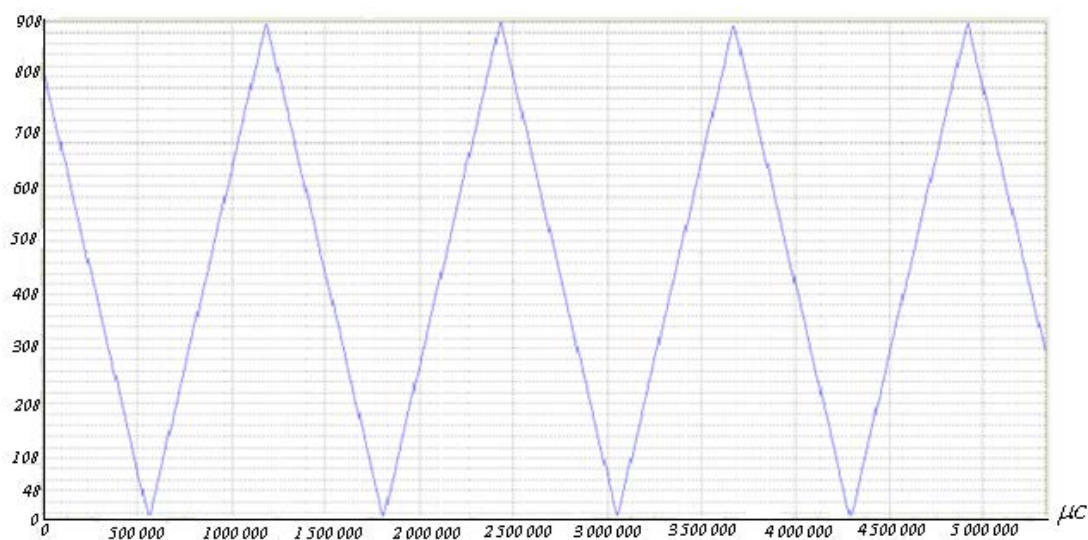


Рис. 71. График скорости в масштабе 1:1

Программа 5

$P=100000, W=1000, A=10$	Задать позицию с ограничением скорости и ускорения
$WAIT(W>500)$	Ожидание достижения определенной скорости
$P=100000, W=1000, A=50$	Изменение ограничения ускорения
$WAIT(P>50000)$	Ожидание достижения промежуточной позиции
$P=100000, W=1500, A=100$	Изменение ограничений скорости и ускорения
$WAIT(P>100000)$	Ожидание завершения позиции
$P=0, W=2000, A=200$	Возврат в исходную позицию
$D=2000$	Ожидание завершения цикла
$REPEAT$	Повторить программу с начала

5.2.4.2. Инициализация текущей позиции привода

Для инициализации текущей позиции привода используется следующая команда:

$PCUR=<Выражение>$.

При выполнении данной команды выполняется одновременно инициализация текущей позиции привода и задания контура позиции, при этом движения вала двигателя не происходит.

ВНИМАНИЕ! Не используйте команду установки текущей позиции при вращении вала двигателя.

Данная команда наиболее часто используется во время *выхода в нулевую позицию*, при работе привода в составе станка (*Программа 6*).

Программа 6

$W=-350$	Двигаться к левому концевому датчику
$WAIT(P_IN.0=1)$	Ожидание срабатывания концевого выключателя
$W=30$	Двигаться в обратном направлении с малой скоростью
$WAIT(P_IN.0=0)$	пока не разомкнется выключатель
$P=P, A=5000$	Максимально быстро захватить текущую позицию
$D=500$	Ожидание завершения позиционирования
$PCUR=0$	Объявляем текущую позицию за нуль
$PROGRAM 1$	Переход к основной программе

5.2.4.3. Усредненное значение момента

Для отслеживания усредненного значения момента в языке программирования *SML* используется параметр *I*. Привод использует замкнутый принцип регулирования, поэтому в режиме позиционирования или в режиме управления скоростью привод автоматически корректирует развиваемый момент, чтобы преодолеть противодействующий момент и выполнить задание с требуемыми характеристиками. Поэтому параметр *I* может свидетельствовать о режиме работы привода. Параметр *I*

доступен только на чтение и может использоваться в выражениях и условных операциях. Его формат – IQ12.

Наиболее часто данный параметр используется для выхода в нулевую позицию при использовании вместо концевого выключателя механического упора (*Программа 7*).

Программа 7 – поиск нулевой позиции по упору

W=-150	Задание контура скорости
WAIT(ABS(I)>800)	Усредненное значение момента, развиваемое при токе примерно 0.2 А
W=0,A=500	Выполнить быстрый останов
D=500	Ожидание завершения останова
PCUR=0	Объявляем текущую позицию за нуль
PROGRAM 1	Переход к основной программе

5.2.4.4. Поиск Z-метки

При использовании относительных датчиков, таких как квадратурные энкодеры, привод при включении не в состоянии выставить определенный угол, что требуется в некоторых приложениях, поэтому в большинстве энкодеров присутствует дополнительный сигнал Z, который встречается один раз за оборот вала двигателя. Это позволяет приводу найти с высокой точностью нулевую позицию вала и относительно неё выставить требуемый угол.

Кроме того, использование данной метки позволяет выполнить выход в нулевую позицию при работе приводов в составе станков, линейных модулей, с высокой точностью (*Программа 8*). Для выполнения подобных задач в язык программирования включена функция:

#rst_pos_i(<Константа>),

где <Константа> принимает значение 0, если при поиске Z-метки требуется вращение против часовой стрелки, или 1 – по часовой стрелке.

Программа 8 – поиск нулевой позиции с использованием Z-метки

W=-150	Задание контура скорости
WAIT(P_IN.0=1)	Ожидание срабатывания концевого выключателя
W=0,A=500	Выполнить быстрый останов
D=500	Ожидание завершения останова
W=30	Задание контура скорости в обратном направлении
WAIT(P_IN.0=0)	Ожидание выключения концевого выключателя
W=0,A=500	Выполнить быстрый останов
PCUR=0	Объявляем текущую позицию за нуль
#rst_pos_i(1)	Выполнить поиск Z-метки
IF(P>4000)	вал повернулся больше чем на 1 оборот – ошибка ¹
HALT	
ENDIF	
PCUR=0	Объявляем текущую позицию за нуль
PROGRAM 1	Переход к основной программе

5.2.4.5. Установка ограничений позиции

При работе привода в рамках исполнительной системы, как правило, существуют ограничения угла поворота вала двигателя. В языке программирования предусмотрены функции установки программных ограничителей позиции при движении в положительную и отрицательную сторону.

Синтаксис функций:

p_limit_r(<Операнд>)

p_limit_l (<Операнд>).

При обнаружении выхода угла поворота вала за пределы отрезка [*p_limit_l*; *p_limit_r*] система управления выполнит останов с максимально возможным ускорением, а затем медленно вернется в допустимые пределы.

¹ Пример составлен для привода с разрешением энкодера 4000 импульсов на оборот.

При установке ограничителей в значение -2^{31} их действие отключается. Функции не записывают введенные программно ограничения по позиции в энергонезависимую память программ, поэтому ограничения сбрасываются после перезапуска привода.

Программа 9 – установка ограничений позиции

#p_limit_l(-2147483647)	Выключить левый ограничитель
#p_limit_r(-2147483647)	Выключить правый ограничитель
X=2	Инициализация счётчика цикла
WHILE(X>0)	Цикл периодического движения
P=8000	
D=1500	
P=-8000	
D=1500	
X=X-1	
ENDWHILE	
P=0	
D=1500	
#p_limit_l(-4000)	Установить левый ограничитель
#p_limit_r(-4000)	Установить правый ограничитель
X=2	Инициализация счётчика цикла
WHILE(X>0)	Цикл периодического движения
P=8000	
D=1500	
P=-8000	
D=1500	
X=X-1	
ENDWHILE	
HALT	Прекратить выполнение программы

Результат отработки *Программы 9* представлен на рис. 72

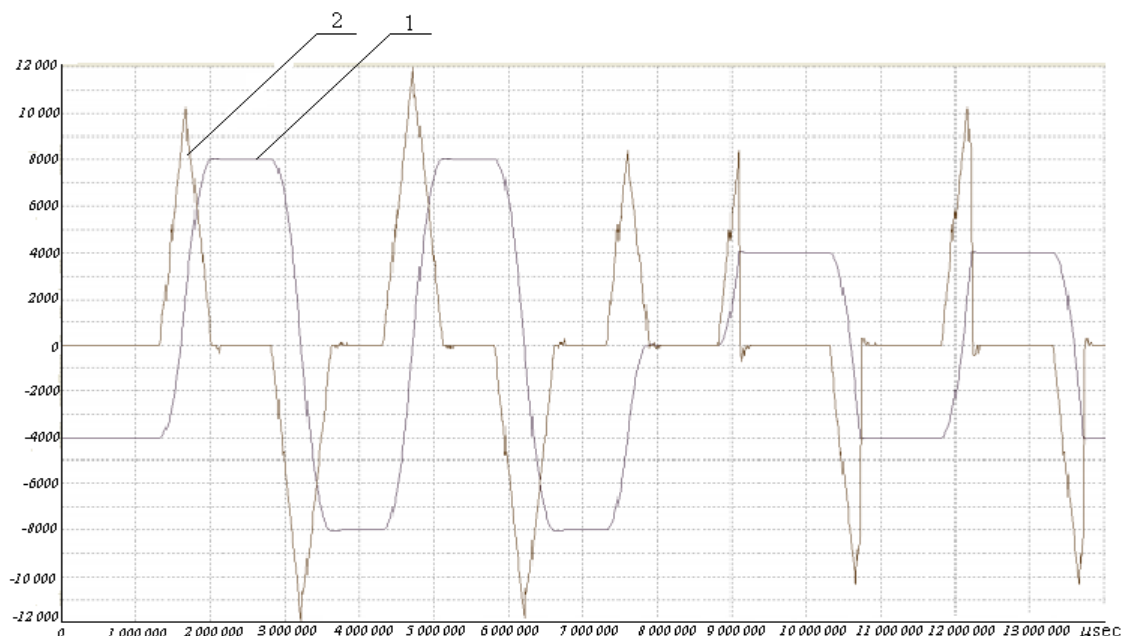


Рис. 72. График 1 позиции в масштабе 1:1, график 2 скорости в масштабе 20:1

5.2.5. События

В языке программирования *SML* предусмотрена возможность асинхронной обработки различных событий по аналогии с обработчиками прерывания в языках ассемблер и СИ.

Для добавления события необходимо его зарегистрировать в начале программы с указанием условий, при котором активизируется его обработчик. Каждое событие может находиться в активном или неактивном состоянии. Если событие активизировано, то обработчик запустится при срабатывании условия. В неактивном состоянии обработчик события не вызывается.

Синтаксис регистрации события, неактивного по умолчанию:

EVENT<Номер><Условие>.

Синтаксис регистрации события, активного по умолчанию:

EVENT<Номер>+<Условие>.

Также доступно специальное событие *START*, срабатывающее только перед запуском программы на выполнение.

Синтаксис регистрации:

EVENT<Номер>+START,

где *<Номер>* – порядковый номер события.

ОГРАНИЧЕНИЯ:

1. Нумерация событий должна идти подряд, начиная с 0.
2. В условиях событий нельзя использовать параметры привода.

Помимо активации события при декларации предусмотрены команды явной активации и деактивации событий, которые могут быть использованы как в теле основной программы, так и в теле обработчика событий.

Синтаксис команды активации события:

+EVENT<Номер>.

Синтаксис команды деактивации события:

-EVENT<Номер>.

При выполнении условия «Условие» ПЛК прерывает выполнение основной программы и переходит к обработчику события. Все процедуры обработки событий располагаются непосредственно за основным телом программы.

Синтаксис обработчика событий:

***ON_EVENT<Номер>
<Операции>.***

ОГРАНИЧЕНИЯ:

1. Перед обработчиком первого события обязательно должна присутствовать команда *REPEAT*, *HALT* или *PROGRAM*.
2. В обработчиках событий нельзя использовать команду задержки *D=<мс>*. Непосредственно перед началом выполнения обработчика события произошедшее событие автоматически переводится в неактивное состояние. При одновременном срабатывании нескольких условий событий сначала будет выполнен обработчик события с меньшим номером. Если при выполнении обработчика события выполнено условие другого события, то его обработчик будет вызван, только если условие сохранится после окончания выполнения обработчика текущего события.

ВНИМАНИЕ! Обработчик события по смыслу близок к обработчику прерывания в процессоре, поэтому избегайте использования в обработчиках потенциально опасных действий, таких как циклы ожидания (*WAIT*), циклические операции (*WHILE*). Данные операции могут привести к длительному или бесконечному циклу обработки события, что повлияет как на работу ПЛК, так и на работу других модулей, таких как модуль связи с ПК и др.

Примеры программ использования событий приведены ниже.

В Программу 10 включено событие *EVENT 0*, срабатывающее только перед запуском программы на выполнение. Текст обработчика события 0 приведен после команды *HALT* основной программы.

Программа 10

<i>EVENT 0+START</i>	Декларация события 0, которое активируется один раз непосредственно перед запуском программы на выполнение
<i>WHILE(X>0)</i>	Цикл последовательного перемещения на 4000 импульсов X раз
<i> X=X-1</i>	
<i> P=P+4000</i>	
<i> D=1000</i>	
<i>ENDWHILE</i>	
<i>HALT</i>	Завершить выполнение программы

<i>ON_EVENT 0</i>	Обработчик события 0
<i>X=up0</i>	Выполнить инициализацию переменной <i>X</i> значением, находящимся в параметре <i>up0</i>

В Программу 11 включено событие *EVENT 0*, срабатывающее в аварийной ситуации при низкой скорости вращения. Текст обработчика события 0 приведен после команды *REPEAT* основной программы.

Программа 11

<i>EVENT 0 ABS(W)<100</i>	Событие 0 – скорость ниже заданной. Событие по умолчанию не активное
<i>W=200</i>	Задание скорости
<i>WAIT(W>100)</i>	Ожидание выхода на заданное значение
<i>+EVENT 0</i>	Активизируем событие 0
<i>REPEAT</i>	Основная программа представляет собой пустой цикл ожидания событий
<i>ON_EVENT 0</i>	Обработчик события 0 – низкая скорость вращения
<i>P_OUT.0=1</i>	Выставить аварийный сигнал
<i>W=0,A=1000</i>	Выполнить быстрый останов
<i>WAIT(W<2)</i>	Ожидание завершения вращения
<i>\$drv_status=1</i>	Установить статус привода «Останов по команде»
<i>cp7=0</i>	Выключить генерацию ШИМ-сигнала

5.2.6. Статус сервопривода

В языке программирования предусмотрена переменная, с помощью которой осуществляется доступ к статусу привода (включен или остановлен). Данная переменная может использоваться как в выражениях, так и в условиях, ее синтаксис:

\$drv_status =<Выражение>.

При установке привода в состояние 1 привод переводится в состояние «Останов». При этом генерация управляющего сигнала двигателя прекращается.

Установка статуса в состояние 0 возобновляет генерацию управляющего сигнала.

Программа 12 – пример программы управления статусом

<i>EVENT 0+P_IN.0=1</i>	Событие – нажата кнопка аварийного останова
<i>EVENT 1+P_IN.0=0</i>	Событие – отпущена кнопка аварийного останова
<i>IF(\$drv_status!=0)</i>	Если привод по каким-либо причинам перешел в аварийное состояние, то
<i>P_OUT.0=0</i>	выводим статус на порт вывода
<i>ELSE</i>	
<i>P_OUT.0=1</i>	
<i>ENDIF</i>	
<i>REPEAT</i>	
<i>ON_EVENT 0</i>	
<i>\$drv_status=1</i>	Аварийный останов – снять питание с двигателей
<i>+EVENT 1</i>	Разрешить включать привод при отпускании кнопки
<i>ON_EVENT 1</i>	
<i>\$drv_status=0</i>	Кнопка аварийного останова отпущена – включить привод
<i>+EVENT 0</i>	Разрешить реакцию на нажатие кнопки

При выполнении программы в фоновом режиме (в режиме нереального времени) ПЛК отрабатывает команду примерно за 50 мкс, что не позволяет гарантировать временной интервал, в течение которого будет обработано то или иное событие, возникшее в приводе. Однако существуют события,

связанные с безопасностью работы привода и системы в целом, при наступлении которых время реакции должно быть строго определено и заранее известно. К таким событиям относится выключение привода через порт ввода.

Для таких событий в ПЛК СПШ предусмотрена функция `#crash_port`. Ее синтаксис:

`#crash_port (<Константа>),`

где *<Константа>* формируется с помощью следующего выражения:

`(Номер порта) | (Уровень << 4),`

где *Номер порта* – десятичное число от 0 до 3, определяющее, какой порт является входом сигнала аварийного останова; *Уровень* – принимает значение 0 или 1 и соответствует уровню, при котором срабатывает механизм аварийного останова.

Для отключения функции по аварийному входу введите команду

`#crash_port(15).`

Время срабатывания аварийного останова в данном случае гарантированно не превысит 50 мкс.

Например, если аварийный сигнал подключен к порту 1, а уровень срабатывания 1, то сформированная константа будет равна $(0x01) | (0x01 << 4) = (1) | (0x10) = 0x11$.

6. Методические указания к выполнению лабораторных работ

В соответствии с учебным планом дисциплины «Автоматизированный электропривод» студенты филиала «Протвино» государственного университета «Дубна» выполняют четыре лабораторных работы, три из которых выполняются на стендах 1, 2 и 3, организованных на базе промышленных сервоприводов СП 25 и СПШ с различными модулями линейных перемещений:

- стенд № 1 выполнен на базе комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 750 Вт (§ 4.1.1);
- стенд № 2 выполнен на базе комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 330 Вт (§ 4.1.2);
- стенд № 3 выполнен на базе интегрированного сервопривода СПШ20-34100 (§ 4.2.1).

Процесс выполнения лабораторных работ организован таким образом, что каждая бригада студентов использует все три стенда (табл. 19), т.е. при выполнении каждой из трех лабораторных работ студент работает на новом стенде. Отдельная лабораторная работа выполняется на трех стендах одновременно.

Таблица 19. График выполнения лабораторных работ

Номер бригады студентов	Лабораторная работа № 1			Лабораторная работа № 2			Лабораторная работа № 3		
	Стенд № 1	Стенд № 2	Стенд № 3	Стенд № 1	Стенд № 2	Стенд № 3	Стенд № 1	Стенд № 2	Стенд № 3
1	+				+				+
2		+				+	+		
3			+	+				+	
4	+				+				+
5		+				+	+		
6			+	+				+	

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить правила безопасной работы с используемыми на стендах сервоприводами.

Обязательные требования по обеспечению безопасной работы с сервоприводами

Для обеспечения безопасной работы с сервоприводами необходимо выполнить ряд перечисленных ниже обязательных требований [16; 17]:

- подключение/отключение разъема питания, кабелей подключения к двигателю, датчику обратной связи и интерфейсным разъемам *осуществляется только в обесточенном состоянии*;
- не удерживайте вал двигателя во включенном состоянии руками во избежание травм;
- не вращайте вал двигателя извне в обесточенном состоянии со скоростью свыше 300 об/мин; при вращении вала двигателя при отключенном питании привод переходит в генераторный режим, вырабатываемое при этом напряжение может повредить систему управления привода;
- не объединяйте сервоприводы СПС жесткими механическими передачами между собой;
- не превышайте допустимое аксиальное усилие на вал серводвигателя; для двигателя СПС-80.007.033 допустимое аксиальное усилие составляет 15 Н (1.5 кГ); для двигателя СПС-80.016.075 допустимое аксиальное усилие составляет 18 Н (1.8 кГ);
- не превышайте допустимое радиальное усилие; для всех двигателей СПС-80.xxx.xxx допустимое радиальное усилие составляет 75 Н (в 20 мм от фланца двигателя);
- не превышайте допустимое аксиальное усилие на вал серводвигателя СПШ20-34100, составляющее 200 Н (20 кГ);
- при включении сервопривода СПШ нагрузка на валу двигателя не должна превышать 1 Нм; в момент включения сервопривод выполняет алгоритм поиска нулевой фазы, для этого в одну из обмоток двигателя подается ток 1.5 А в течение 1.5 с; в процессе выполнения алгоритма вал двигателя перемещается на угол не более 1.8 градуса в произвольном направлении;
- избегайте резких переходных процессов по скорости, причиной которых может служить неправильная настройка коэффициентов контуров скорости и позиции; частые биения вала приводят к быстрому износу подшипников двигателя и исполнительных механизмов, присоединенных к приводу;
- соблюдайте общие требования электробезопасности.

6.1. Лабораторная работа № 1.

Разработка программ управления сервоприводами на языке *SML* в среде *МотоМастер*©

Цель работы – получение навыков разработки программ для внутреннего ПЛК на языке *SML* в среде *МотоМастер*©, осуществляющих управление сервоприводами переменного тока.

Задание на выполнение лабораторной работы

1. Подготовьтесь к выполнению лабораторной работы, изучив теоретический материал, указанный в разделе «Подготовка к выполнению лабораторной работы № 1».

2. В соответствии с заданным алгоритмом движения, представленным на рис. 73, и параметрами, представленными в табл. 20, разработайте программу управления сервоприводом на языке *SML*, позволяющую:

- определять нулевую точку позиционирования;
- автоматически осуществлять точное позиционирование сервопривода с ограничением скорости и ускорения;
- осуществлять циклическое движение сервопривода по заданному алгоритму.

При разработке программы используйте примеры *Программы 6* (§ 5.2.4.2) и *Программы 5* (§ 5.2.4.1).

3. Для получения графиков изменения регулируемых величин (позиции и скорости) настройте графический интерфейс *МотоМастер*© в окнах «Конфигурация», «Осциллограф», «Контроль».

4. Получите навыки построения графиков движения с ограничением ускорения и скорости в графическом интерфейсе *МотоМастер*©, выделив участки перемещения:

- с нарастанием координаты позиции при циклической отработке движения;
- с убыванием координаты позиции при циклической отработке движения, включая участок изменения позиции от $P = P2$ до $P = 0$ (выход в начальную позицию).

5. Подготовьте отчет о выполненной работе и представьте его к защите.



Рис. 73. Алгоритм поиска нулевой точки позиции и управления движением сервопривода

Заданные значения позиции $P1$, $P2$, скорости $W1 - W5$, ускорения $A1 - A5$ указаны в табл. 20. Скорости $W1 - W5$ задаются в об/мин, и при записи в привод программа *МотоМастер*© выполняет пересчет параметра «скорость» во внутренний формат (в дискретах) по формуле

$$\omega(\text{дискрет}) = \frac{\omega(\text{об/мин}) \cdot st1 \cdot vp3}{60 \cdot vp4},$$

где описания и значения параметров $vp3$, $vp4$, $st1$ представлены в табл. 13.

При чтении из привода осуществляется обратное преобразование из дискрет в об/мин по формуле

$$\omega (\text{об / мин}) = \text{round} \left(\frac{\omega(\text{дискрет}) \cdot 60 \cdot \text{vp4}}{\text{st1} \cdot \text{vp3}} \right).$$

Таблица 20. Задание параметров для программы управления движением сервопривода

Параметр	Бригада № 1	Бригада № 2	Бригада № 3	Бригада № 4	Бригада № 5	Бригада № 6
Позиция P1, (дискрет)	150000	100000	130000	125000	120000	140000
Позиция P2, (дискрет)	1500	1000	1300	1200	1100	1400
Скорость W1, (об/мин)	–200	–150	–300	–250	–180	–350
Скорость W2, (об/мин)	30	25	20	25	20	25
Скорость W3, (об/мин)	900	1000	800	700	1100	900
Скорость W4, (об/мин)	1400	1500	1200	1100	1300	1000
Скорость W5, (об/мин)	3000	3000	2000	2500	2800	1800
Ускорение A1, (дискрет/сек)	5500	6000	5000	5200	5700	4800
Ускорение A2, (дискрет/сек)	15	20	10	18	25	12
Ускорение A3, (дискрет/сек)	60	80	50	70	100	60
Ускорение A4, (дискрет/сек)	120	150	100	140	180	120
Ускорение A5, (дискрет/сек)	250	300	200	270	350	240

Подготовка к выполнению лабораторной работы № 1

Перед выполнением лабораторной работы № 1 студентам необходимо изучить материал, изложенный в настоящем пособии в главе 4 «Отечественные промышленные сервоприводы с векторным управлением типов СПС 25 и СПШ», в соответствии с графиком выполнения лабораторных работ (глава 6, табл. 19):

- студенты бригад № 1 и 4 выполняют лабораторную работу № 1 на стенде № 1 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 750 Вт (§ 4.1.1);
- студенты бригад № 2 и 5 выполняют лабораторную работу № 1 на стенде № 2 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 330 Вт (§ 4.1.2);
- студенты бригады № 3 и 6 выполняют лабораторную работу № 1 на стенде № 3 и изучают конструкцию и технические характеристики интегрированного сервопривода СПШ20-34100 (§ 4.2.1).

Поскольку структура систем управления на всех стендах идентична, то при подготовке к выполнению лабораторной работы студенты всех бригад изучают материал, изложенный в следующих параграфах:

- Системы подчиненного управления сервоприводами СПС25 и СПШ20 (§ 4.3).
- Параметры сервоприводов СПС25 и СПШ20 (из § 4.5: статические (§ 4.5.1), управления (§ 4.5.2), динамические, используемые только для просмотра (§ 4.5.3), пользовательские (4.5.6)).
- Графический интерфейс программы *МотоМастер*© (§ 4.4.1).
- Работа с осциллографом (§ 4.4.1.3).
- Программирование логического контроллера (§ 4.4.1.4).
- Разработка программ на языке *SML* (глава 5):
 - обозначения и форматы данных (§ 5.1);
 - команды перехода и останова (§ 5.2.1), условных и циклических операций (§ 5.2.2), управления портами ввода-вывода (§ 5.2.3), управления движением сервопривода (§ 5.2.4).

Порядок выполнения работы

1. Изучите обязательные требования по обеспечению безопасной работы с сервоприводами, изложенные в главе 6, и пройдите инструктаж по технике безопасности.
2. Перед началом работы управляющий компьютер и автомат включения силового питания сервопривода должны быть выключены.
3. Ответьте на вопросы преподавателя по конструкции сервопривода и расположению его частей на стенде.
4. Согласуйте с преподавателем текст разработанной на языке *SML* программы управления движением сервопривода.
5. Включите управляющий компьютер и с его рабочего стола войдите в программу *МотоМастер*©, используя соответствующий ярлык.

6. Включите силовое питание сервопривода.
7. Примерно через одну минуту после включения силовой части на контрольной панели интерфейса программы *МотоМастер*© с помощью мышки включите клавишу 1 (рис. 62) поиска сервопривода. После его нахождения инициализируется кнопка 2 контрольной панели, щелкните по ней левой кнопкой мыши для открытия графического интерфейса программы *МотоМастер*© для выбранного сервопривода (рис. 61).
8. В режиме «Конфигурация» (рис. 61, 64) установите следующие значения параметров сервопривода:
 - $Cp5$, $Vp7$, $Pp5$ (состояния контуров момента, скорости, положения) – замкнуты;
 - $Cp1$, $Cp2$, $Vp1$, $Vp2$, $Vp16$, $Pp1$, $Pp2$ (коэффициенты ПИ- и ПИД-регуляторов) – по указанию преподавателя;
 - значения остальных параметров – по умолчанию.
9. Перейдите в режим «Контроль» (рис. 69), выберите номер банка (для бригады № 1 – банк 1, для бригады № 2 – банк 2, для бригады № 3 – банк 3, для бригады № 4 – банк 4, для бригады № 5 – банк 5, для бригады № 6 – банк 6). На панели «Просмотр» отобразится программа, хранящаяся в выбранном банке.
10. С помощью клавиши  перейдите на панель «Редактирование» и сформируйте согласованный с преподавателем текст программы на языке *SML*.
11. Проверьте введенный текст программы и с помощью клавиши  переместите программу в текущий банк.
12. Перейдите в режим «Осциллограф».
13. Для выбора отображаемых каналов выберите кнопку «Каналы» (рис. 65). При этом отобразится окно, приведенное на рис. 66.
14. Задайте 2 канала отображения (допускается не более трех, § 4.4.1.3.1, рис. 66): текущая скорость вращения, об/мин (динамический параметр $Dd4$) и текущая позиция, дискрет (динамический параметр $Dd7$).
15. Перейдите к окну настройки каналов (рис. 67) и задайте для каждого канала: номер двигателя (соответствует номеру выбранного привода на рис. 61); цвет графика; множитель (первоначально для текущей скорости выбираем масштаб 1:1, для перемещения – 1:40); смещение относительно начала координат (первоначально смещение равно 0).
16. Настройте внешний вид осциллографа и отображения графиков в соответствии с рекомендациями, изложенными в § 4.4.1.3.3.
17. Перейдите в режим «Контроль» и кликните на кнопку  для запуска *Программы*.
18. Для запуска осциллографа перейдите в режим «Осциллограф» и кликните на кнопку «Старт». Дождитесь отображения графиков на экране.
19. Для остановки *Программы* кликните на кнопку  «Стоп».
20. Проанализируйте качество графиков на экране. Если качество графиков не устраивает пользователя, то или измените масштабы отображаемых параметров (п. 14), или, по согласованию с преподавателем, подкорректируйте текст *Программы* или заданные в п. 7 значения коэффициентов регуляторов и повторите выполнение пунктов 16–19.
21. Если качество графиков удовлетворяет требованиям пользователя, то сделайте фотографию полученных графиков.
22. Выделите и увеличьте участки осциллограммы, соответствующие перемещению от позиции $P=0$ до позиции $P=P1$ и наоборот от позиции $P=P1$ до позиции $P=0$. Для увеличения отдельных участков анализируемой осциллограммы выполните действия, описанные в § 4.4.1.3.2 «Управление осциллографом». Сфотографируйте оба участка.
23. Покажите полученные фото преподавателю.
24. Выключите автомат силового питания сервопривода.
25. Выключите компьютер.

Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе представляется к защите каждым студентом и должен содержать:

1. Стандартный титульный лист (Приложение).
2. Цель работы.
3. Основные характеристики используемого модуля линейных перемещений.
4. Основные характеристики используемого двигателя.

5. Схему алгоритма управления движением сервопривода с поиском нулевой позиции, ограничением скорости и ускорения. Заданные в табл. 6.2.1 численные значения параметров движения.
6. Текст программы управления движением сервопривода на языке *SML*.
7. Скриншот окна осциллографа в режиме «Контроль» при запуске программы.
8. Скриншоты графиков текущей позиции и текущей скорости:
 - при выполнении 2–3 циклов программы;
 - участки графиков, соответствующие изменению позиции от $P=0$ до $P=P1$;
 - участки графиков, соответствующие изменению позиции от $P=P1$ до $P=0$, включая перемещение привода в начальное положение.
9. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Принцип действия и механические характеристики синхронного двигателя при частотном управлении.
2. Принцип действия гибридного шагового двигателя.
3. Определения скалярного и векторного управления двигателями переменного тока.
4. Принцип подчиненного управления сервоприводом.
5. Для чего используются режимы «Конфигурация», «Осциллограф», «Контроль» графического интерфейса *МотоМастер*©?

6.2. Лабораторная работа № 2.

Настройка контура скорости промышленного сервопривода. Определение численных значений показателей качества управления

Одним из главных достоинств систем подчиненного управления является отдельная настройка контуров регулирования на технический оптимум, что существенно упрощает практическую настройку всего сервопривода в целом. В процессе настройки контура выполняется анализ динамических характеристик сервопривода, что позволяет определить численные значения показателей качества управления и выбрать оптимальное сочетание настраиваемых параметров.

Цель работы – получение навыков настройки в *тестовом режиме* работы сервопривода контура скорости с ПИД-регулятором и навыков определения качества настройки при различных значениях приведенного к валу двигателя момента инерции.

Задание на выполнение лабораторной работы

1. Подготовьтесь к выполнению лабораторной работы, изучив теоретический материал и выполнив задания, приведенные в разделе «Подготовка к выполнению работы № 2».
2. Освойте процедуру задания исходных значений параметров сервопривода перед настройкой контура скорости.
3. Для получения графиков переходных процессов в контуре скорости настройте графический интерфейс *МотоМастер*© в окнах «Конфигурация», «Осциллограф», «Контроль».
4. Получите практические навыки настройки частоты дискретизации, пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих цифрового ПИД-регулятора.
5. Получите навыки расчета показателей качества управления по полученным графикам переходных процессов.
6. Для полученных экспериментально параметров запишите математическое выражение ПИД-регулятора, связывающее входной сигнал ошибки и выходной сигнал управления.
7. Оцените качество управления при плавном разгоне и разных значениях момента инерции.
8. Подготовьте отчет о выполненной работе и представьте его к защите.

Подготовка к выполнению работы

1. В соответствии с графиком выполнения лабораторных работ (глава 6, табл. 19):
 - студенты бригад № 1 и 4 выполняют лабораторную работу № 2 на стенде № 2 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 330 Вт (§ 4.1.2);
 - студенты бригад № 2 и 5 выполняют лабораторную работу № 2 на стенде № 3 и изучают конструкцию и технические характеристики интегрированного сервопривода СПШ20-34100 (§ 4.2.1);
 - студенты бригад № 3 и 6 выполняют лабораторную работу № 2 на стенде № 1 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 750 Вт (§ 4.1.1).

Величины коэффициентов передачи механических частей сервоприводов определяются следующим образом:

- 1.1 Для стенда № 1 (§ 4.1.1, табл. 7) с редуктором ($i = 5$, $K_P = 1/i = 0.2$) и модулем линейных перемещений «шестеренка – рейка» типа АР-1 (число зубьев шестеренки $z = 24$, модуль $m = 1.5$):

$$K_{AP-1} = \frac{K_P \cdot z \cdot m}{2} \cdot 10^{-3} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ (м/рад)}.$$

- 1.2 Для стенда № 2 (§ 4.1.2, табл. 9) с модулем линейных перемещений типа СТМ-2 на основе шарико-винтовой пары с шагом винта $s = 10$ мм:

$$K_{СТМ-2} = \frac{s}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ (м/рад)}.$$

- 1.3 Для стенда № 3 (§ 4.2.1, табл. 11) с модулем линейных перемещений типа МР110 с зубчато-ременной передачей, обеспечивающей на 1 оборот шкива перемещение каретки $s_K = 194.2$ мм:

$$K_{MP110} = \frac{s_K}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 30.9 \cdot 10^{-3} \text{ (м / рад) .}$$

- 1.4 Рассчитайте массу m груза, который необходимо закрепить на рабочем столе узла линейных перемещений, чтобы приведенный к валу двигателя момент инерции $J_{пр}$ был в два раза больше момента инерции ротора двигателя J_P . Например, для стенда № 1:

$$J_{пр} = J_P + m \cdot K_{AP-1}^2 ,$$

$$m = J_P / K_{AP-1}^2 .$$

2. Методика настройки цифровых ПИД-регуляторов [24].

На всех трех лабораторных стендах в контуре скорости используется пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор).

Для его оптимальной настройки и, как следствие, получения желаемого качества управления необходимо понимание механизмов и принципов работы ПИД-регулятора.

При ПИД-регулировании сигнал управления зависит не только от разницы между текущим и заданным значением (величины ошибки или рассогласования), а также от накопленной ошибки (интеграла) и от скорости изменения ошибки во времени (дифференциала). В результате ПИД-регулятор обеспечивает такое значение сигнала управления, при котором ошибка в установившемся режиме стремится к нулю. Качество управления определяется многими факторами, ключевыми являются недетерминированность объекта управления, точность ввода-вывода регулятора и интенсивность внешних воздействий.

Математическое выражение цифрового ПИД-регулятора:

$$Y_i = \left(K_p \cdot \varepsilon_i + K_d \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta t_{изм}} + K_i \cdot \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм} \right) \cdot 100\%, \quad (28)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент; ε_i – ошибка (рассогласование, разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины); K_d – коэффициент при дифференциальной составляющей ; $\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$ – разность ошибок соседних измерений; $\Delta t_{изм} = t_i - t_{i-1}$ – время между соседними измерениями; K_i – коэффициент при интегральной составляющей; $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}$ – накопленная к i -му шагу сумма рассогласований (интегральная сумма).

Часто при настройке цифрового ПИД-регулятора используют другое выражение:

$$Y_i = K_p \cdot \left[\varepsilon_i + T_d \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta t_{изм}} + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм} \right] \cdot 100\%, \quad (29)$$

где T_d – постоянная времени дифференцирования; T_i – постоянная времени интегрирования.

Из формул (28) и (29) следует, что сигнал управления Y_i является суммой трех составляющих: пропорциональной (слагаемое 1), дифференциальной (слагаемое 2) и интегральной (слагаемое 3).

Пропорциональная составляющая зависит от текущей ошибки ε_i и компенсирует текущую ошибку пропорционально ее величине.

Дифференциальная составляющая зависит от скорости изменения ошибки $\varepsilon_i / \Delta t_{изм}$ и компенсирует резкие возмущения.

Интегральная составляющая накапливает ошибку регулирования, что позволяет ПИД-регулятору поддерживать нулевую ошибку в установившемся режиме (устраняет статическую ошибку управления).

Соотношения между коэффициентами и постоянными времени:

$$K_d = K_p \cdot T_d, \quad (30)$$

$$K_i = K_p / T_i. \quad (31)$$

Настройке подлежат четыре параметра: частота дискретизации $f_{\text{диск}} = 1/\Delta t_{\text{изм}}$; коэффициенты K_p , K_d , K_i соответственно пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих.

Перед настройкой параметров регулятора необходимо задать ограничения на величины скорости и ускорения, определяемые конструктивными особенностями механической части привода, а также определить перечень показателей качества регулирования.

Если механическая система, к которой подключается привод, допускает разгон с максимальным ускорением (включаем «Режим с максимальной динамикой»), то используем ступенчатое изменение уставки (для контура скорости уставка $\omega_{\text{сп}}$ – это заданная величина угловой скорости двигателя, на которую регулятор должен выйти в установившемся режиме, рис. 74).

При настройке обеспечим технически оптимальный процесс, т.е. такой переходный процесс, при котором время t_1 изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании $\Delta\omega$, не превышающим 4–10% (рис. 74). Такой переходный процесс при ступенчатом входном воздействии является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным [35].

2.1. *Определение показателей качества управления.* При выполнении лабораторной работы № 2 по графикам переходных процессов (см. рис. 74) определяются следующие показатели качества управления:

- *время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, с*, характеризует быстродействие системы и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее установившегося значения становится не более $\pm 5\%$;
- *максимальное перерегулирование σ* определяет наибольший «выбег» выходной величины от установившегося значения в переходном процессе, вычисляется относительно установившегося значения в %:

$$\sigma = \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\%,$$

$\sigma \leq (4 \div 10)\%$ для технически оптимального переходного процесса;

- *статическая ошибка $\varepsilon_{\text{уст}}(t)$* определяет точность регулирования скорости:

$$\varepsilon_{\text{уст}}(t) = \omega(t) - \omega_{\text{уст}} \text{ при } t \geq t_{\text{пн}}$$

для цифрового ПИД-регулятора в режиме стабилизации скорости $\varepsilon_{\text{уст}}(t) = 0$;

- *время t_1 достижения $\omega_{\text{уст}}$* определяет величину ускорения при разгоне;
- *число перерегулирований N в интервале $0 \leq t \leq t_{\text{пн}}$* определяется как число выбросов, при которых кривая $V(t)$ располагается ниже значения $\omega_{\text{уст}}$; при настройке ПИД-регулятора на технический оптимум $N = 1$ (см. рис. 74).

Если разгон с максимальным ускорением недопустим, то при настройке используем «Режим плавного разгона/торможения» с ограничением ускорения и анализом указанных выше показателей качества регулирования.

Переходные процессы в настраиваемом синхронном электроприводе отличаются большим разнообразием и сложностью [26]. Определяется это тем, что СД имеет несколько обмоток (статора, возбуждения и пусковую), обтекаемых переменным и постоянным токами, которые магнитно связаны, и в процессе работы двигателя непрерывно меняется расположение магнитных осей относительно друг друга. Во многих практических случаях необходимо учитывать взаимодействие СД и питающей сети. В общем случае переходные процессы в синхронном электроприводе являются электро-механическими, т.е. процессы в электрической и механической частях ЭП связаны друг с другом и имеют, как правило, колебательный характер [25].

Аналитический расчёт параметров не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку полученные результаты основываются на сильно упрощённых моделях объектов [9].

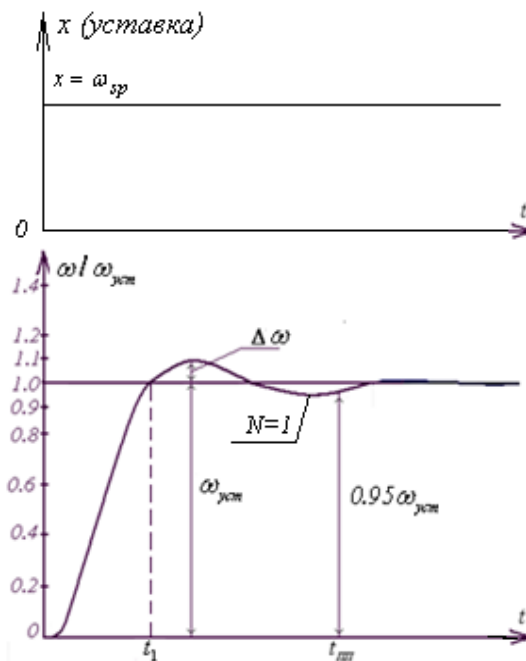


Рис. 74. График технически оптимального переходного процесса с цифровым ПИД-регулятором

Поэтому в рассматриваемых промышленных сервоприводах для экспериментальной настройки контуров подчиненного управления и анализа качества регулирования предусмотрен специальный *тестовый режим* с использованием графического интерфейса *МотоМастер*© [16].

Настройку ПИД-регулятора контура скорости при замкнутых контурах момента и скорости и разомкнутом контуре позиции целесообразно выполнить в следующей последовательности при коэффициенте обратной связи по скорости $K_{OC} = 1$:

1. Определение частоты дискретизации $f_{\text{диск}}$ при заданных по умолчанию значениях коэффициентов K_p , K_d , K_i соответственно пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих.
2. Настройка коэффициента усиления K_p пропорциональной составляющей при определенной в предыдущем пункте частоте дискретизации $f_{\text{диск}}$ и заданных значениях $K_d = K_i = 0$.
3. Настройка коэффициента усиления K_d дифференциальной составляющей при $K_i = 0$.
4. Настройка коэффициента усиления K_i интегральной составляющей.

Частота дискретизации $f_{\text{диск}}$ – это важнейший параметр, задающий не только временной интервал измерения регулируемых величин $\Delta t_{\text{изм}}$, но и период $T_{\text{диск}} = 1/f_{\text{диск}}$ формирования управляющего кода. При определении значения частоты $f_{\text{диск}}$ приходится принимать компромиссное решение, поскольку с увеличением $f_{\text{диск}}$:

- как правило, лучше показатели качества регулирования;
- больше жесткость системы, но уменьшается глубина регулирования, т.е. увеличивается неравномерность вращения;
- больше тепловые потери в полупроводниковых ключах силовых преобразователей (квадратичная зависимость потерь от частоты);
- меньше времени ($T_{\text{диск}} = 1/f_{\text{диск}}$) остается на вычисление управляющего кода, что особенно критично при выполнении операций с дробными числами.

Поэтому важно найти золотую середину. На начальном этапе настройки минимально допустимое значение частоты $f_{\text{диск}}$ определим из условия

$$T_{\text{диск}} \leq 0.1t_{\text{пп}}. \quad (32)$$

Для сервоприводов СПС 25 и СПШ20 частота $f_{\text{диск}}$ задается дискретно и может принимать значения 100 Гц, 200 Гц, ..., 500 Гц (по умолчанию), 1000 Гц, 2000 Гц, 3000 Гц, 5000 Гц, что соответствует значениям $T_{\text{диск}}$ от 10 мс до 200 мкс (по умолчанию $T_{\text{диск}} = 2$ мс).

Ориентировочное значение времени переходного процесса $t_{\text{пн}}$ для исследуемого сервопривода определим *в тестовом режиме* при заданных по умолчанию значениях $f_{\text{диск}}$, $K_{\text{ОС}}$, K_P , K_D , K_I . Для определенного по экспериментальной кривой значения $t_{\text{пн}}$ проверяем выполнение условия (32). Если оно выполняется, то анализируем показатели качества управления и повторяем эксперимент с большей частотой $f_{\text{диск}}$ из доступного ряда значений. Как правило, для ориентировочного выбора $f_{\text{диск}}$ двух-трех экспериментов достаточно, поскольку дальнейшее ее увеличение не приводит к существенному улучшению качества управления.

Если условие (32) не выполняется, то из ряда частот выбираем значение $f_{\text{диск}}$, удовлетворяющее ему. Далее выбор значения $f_{\text{диск}}$ выполняем аналогично описанному выше процессу.

Значение $f_{\text{диск}}$ может быть уточнено после настройки остальных параметров ПИД-регулятора.

При настройке параметров K_P , K_D , K_I цифровых ПИД-регуляторов используем правила с учетом технических особенностей настраиваемых сервоприводов, полученные из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов [38; 24].

Рассмотрим настройку ПИД-регулятора на технический оптимум (§ 4.3).

2.2. Настройка пропорциональной компоненты K_P . Из теории автоматического управления известно [3], чем больше коэффициент K_P , тем быстрее отклик регулятора (выше быстродействие) и меньше ошибка в установившемся режиме, но слишком высокое быстродействие может ввести систему в колебательный режим. Поэтому очень важно определить оптимальное значение K_P .

Перед настройкой величины K_P :

- задается значение $K_P = Vp1 = 0.6$ (значение параметра по умолчанию из табл. 13);
- отключаются интегральный и дифференциальный контуры, $K_I = 0$, $K_D = 0$, что соответствует максимально возможному значению постоянной времени интегрирования T_I и минимально возможному значению постоянной времени дифференцирования T_D .

Запускается тестовая программа и в результате ее выполнения в окне «Осциллограф» графического интерфейса *МотоМастер*[®] появляется переходная характеристика (ее возможные варианты представлены на рис. 75).

Для переходной характеристики типа 1 величина K_P очень велика. Переходная характеристика далека от оптимальной (колебания с амплитудой $\Delta\omega$ и периодом Δt), величину K_P следует уменьшить.

В переходной характеристике типа 2 наблюдаются затухающие колебания (3–4 периода).

При дальнейшем уменьшении величины K_P получаем характеристику 3. Поскольку в дальнейшем предполагается использовать дифференциальную компоненту ПИД-регулятора, то выбранное значение K_P является оптимальным, настройка K_P считается законченной.

Если при начальном значении K_P получаем характеристику одного из типов 4 или 5, то для перехода к характеристике 3 значение K_P следует увеличить.

Следует обратить внимание на то, что во всех переходных характеристиках на рис. 75 установившееся значение скорости не совпадает со значением уставки $\omega_{\text{сп}}$. Чем меньше величина K_P , тем больше остаточное рассогласование (ошибка) $\varepsilon_5 > \varepsilon_4 > \varepsilon_3 > \varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

Наименьшее время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ соответствует кривой 3.

Остаточное рассогласование ε_i , характерное для чисто пропорциональных регуляторов (П-регуляторов), убирается при последующей настройке интегральной компоненты ПИД-регулятора.

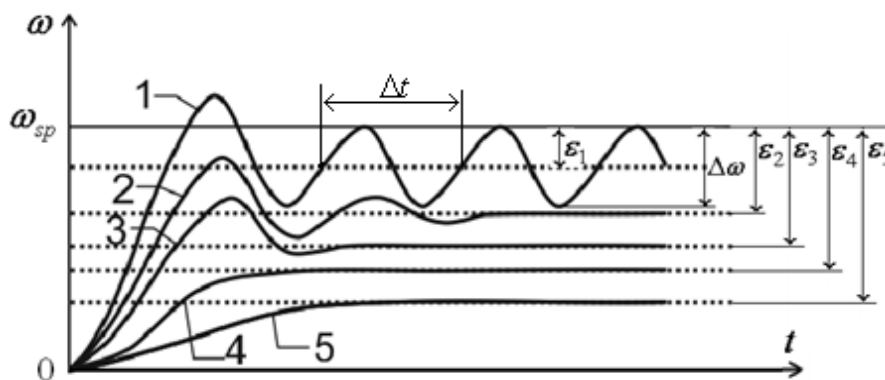


Рис. 75. Возможные виды переходных характеристик при определении величины K_P

2.3. *Настройка дифференциальной компоненты K_D .* На предыдущем этапе была выбрана переходная характеристика, соответствующая графику 1 на рис. 76, в которой присутствуют затухающие колебания.

Настройка дифференциальной составляющей требует достаточно «тонкой настройки» [9].

Следует установить значение K_D таким, чтобы переходная характеристика имела вид кривой 2 на рис. 76. Для настраиваемых приводов в первом приближении задаем близкое к минимальному значение $K_D = 0,001$ с.

Увеличивая значение K_D при каждом эксперименте на 0.001, получаем переходную характеристику 2 (рис. 75).

Дифференциальная компонента уменьшает амплитуду колебаний исходной кривой 1. При этом ошибка ε_2 на рис. 76 меньше, чем ошибка ε_3 на рис. 75. Это значит, что динамическая и статическая точность регулирования при наличии дифференциальной компоненты (ПД-регулятор) может быть выше, чем для П-регулятора.

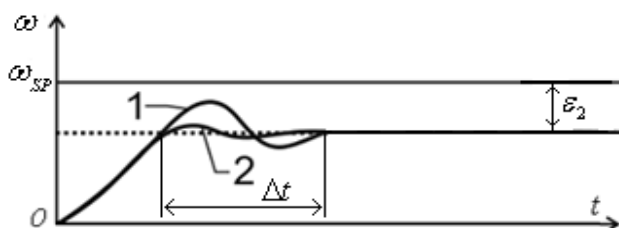


Рис. 76. К настройке дифференциальной компоненты K_D

2.4. *Настройка интегральной компоненты T_I .* После настройки пропорциональной и дифференциальной компонент получается переходная характеристика 1, показанная на рис. 77.

Интегральная компонента предназначена для того, чтобы убрать остаточное рассогласование между установившимся в системе значением скорости и уставкой и свести ошибку к 0. Начинать настраивать постоянную времени интегрирования следует с величины $T_I = \Delta t$, т.е. с задания величины коэффициента $K_I = K_P/T_I = K_P/\Delta t$.

Переходная характеристика типа 2 (рис. 77) получается при чрезмерно большой величине постоянной времени интегрирования T_I . Выход на установившееся значение скорости получается очень затянутым.

Переходная характеристика типа 4 (рис. 77) получается при слишком малой величине постоянной времени интегрирования (слишком большой величине коэффициента K_I). Если величину T_I уменьшить еще, то в системе могут возникнуть колебания.

Уменьшая коэффициент K_I , получаем технически оптимальную переходную характеристику типа 3 (рис. 77) с перерегулированием $\sigma \leq (4 \div 10)\%$ и статической ошибкой $\varepsilon = 0$.

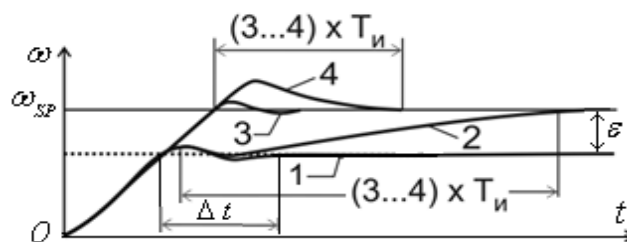


Рис. 77. К определению интегральной компоненты $T_{\text{и}}$

Сервоприводы СПШ и СПС поддерживают *тестовый режим*, с помощью которого можно проанализировать качество переходных процессов в приводе. При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить материал, изложенный в § 4.5.5 «Параметры тестирования».

Кроме того, рекомендуется повторить материал, изученный при подготовке к лабораторной работе № 1: «Параметры сервоприводов СПС25 и СПШ20» (из § 4.5: статические (§ 4.5.1), управления (§ 4.5.2), динамические, используемые только для просмотра (§ 4.5.3), пользовательские (§ 4.5.6)):

- Графический интерфейс программы *МотоМастер*© (§ 4.4.1).
- Работа с осциллографом (§ 4.4.1.3).
- Программирование логического контроллера (§ 4.4.1.4).
- Программы управления движением сервопривода (§ 5.2.4).

Порядок выполнения работы

1. Изучите обязательные требования по обеспечению безопасной работы с сервоприводами, изложенные в главе 6, и пройдите инструктаж по технике безопасности.
2. Перед началом работы управляющий компьютер и автомат включения силового питания сервопривода должны быть выключены.
3. Ответьте на вопросы преподавателя по конструкции сервопривода и расположению его частей на стенде.
4. Включите управляющий компьютер и с его рабочего стола войдите в программу *МотоМастер*©, используя соответствующий ярлык.
5. Включите силовое питание сервопривода.
6. Примерно через одну минуту после включения силовой части на контрольной панели интерфейса программы *МотоМастер*© с помощью мышки включите клавишу 1 (рис. 62) поиска сервопривода. После его нахождения инициализируется кнопка 2 контрольной панели, щелкните по ней левой кнопкой мыши для открытия графического интерфейса программы *МотоМастер*© для выбранного сервопривода (рис. 61).
7. В окне «Конфигурация» графического интерфейса программы *МотоМастер*© (§ 4.4.1, рис. 61) перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур тока (момента)» (§ 4.5.1, табл. 13).

Замкните контур тока, установив параметр $Cr5$ в состояние «Замкнут».

Значения параметров $Cr1$ и $Cr2$ устанавливаются по указанию преподавателя.

Остальные параметры должны иметь значения, приведенные в графе «По умолчанию» табл. 13.

8. Перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур скорости» (§ 4.5.1, табл. 13).
Замкните контур скорости, установив параметр $Vp7$ в состояние «Замкнут».
Установите максимально допустимую скорость вращения $Vp8 = 4500$ об/мин.
Установите значения коэффициентов для контура положения: пропорционального $K_p = Vp1 = 0.6$, интегрального $K_i = 0$, дифференциального $K_d = 0$. Для анализа качества переходного процесса отключите режим плавного разгона, установив параметр $Vp9 = 2$ «Режим с максимальной динамикой».
Остальные параметры должны иметь значения, приведенные в графе «По умолчанию» табл. 13, в том числе, частота дискретизации $Vp4 = 500$ Гц.
9. Перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур позиции» (§ 4.5.1, табл. 13).
Разомкните контур позиции, установив параметр $Pp5$ в состояние «Разомкнут».
10. В режиме «Конфигурация» графического интерфейса программы *МотоМастер*© перейдите к вкладке «Параметры тестирования» (§ 4.5.5, табл. 17).

Установите параметры: $Tr1 = 4$ («Ступенька/Приращение скорости»); период опроса требуемых параметров $Tr2 = 100$ мкс, учитывая, что длительность всего эксперимента составит $Tr2 \cdot 3000$.

11. Перейдите в окно «Осциллограф», выберите канал тестирования «Текущая скорость вращения», масштаб графика и цвет (§ 4.4.1.3).

Выбор частоты дискретизации

1. Перейдите в окно «Контроль» и из банка памяти, указанного преподавателем, выберите тестовую программу (§ 4.4.1.4, рис. 69). После ее отображения в поле «Банк программ» запустите тест, кликнув на клавишу . В программе предусмотрена задержка 2.5 сек. на начало выполнения, необходимая на запуск осциллографа. Поэтому быстро перейдите в окно «Осциллограф» и кликните на клавишу «Старт».
2. Дождитесь отображения графика на экране и кликните на клавишу «Стоп» в окне «Осциллограф».
3. При необходимости скорректируйте масштаб графика, увеличьте значение параметра $Tr2$, если эксперимент завершился прежде, чем закончился переходный процесс, уменьшите значение параметра $Tr2$, если разрешение графиков оказалось слишком низким.
4. Выделите и увеличьте участок переходного процесса (§ 4.4.1.3.2 «Управление осциллографом»), сделайте скриншот выделенного участка и определите время переходного процесса $t_{\text{пп}}$ при частоте дискретизации 500 Гц ($T_{\text{диск}} = 2$ мс).
5. Проверьте выполнение условия $T_{\text{диск}} \leq t_{\text{пп}} / 10$. Если данное условие не выполняется, то выберите из ряда разрешенных частот дискретизации такую, при которой оно выполняется и получите график переходного процесса с выбранной частотой дискретизации.
6. Из ряда разрешенных частот дискретизации выберите следующую большую по величине $f_{\text{диск2}}$. Сделайте скриншот графика переходного процесса для $f_{\text{диск2}}$. Сравните показатели качества управления по графикам полученных переходных процессов в п. 13–15 и сделайте вывод: следует ли увеличить частоту дискретизации $f_{\text{диск2}}$ или ее величина достаточна для дальнейшей настройки параметров ПИД-регулятора.

Настройка пропорциональной составляющей ПИД-регулятора контура скорости

1. Перейдите в окно «Контроль» и из банка памяти, указанного преподавателем, выберите тестовую программу (§ 4.4.1.4, рис. 69) и запустите тест, кликнув на клавишу . Затем быстро перейдите в окно «Осциллограф» и кликните на клавишу «Старт».
2. Дождитесь отображения графиков на экране и кликните на клавишу «Стоп» в окне «Осциллограф». При необходимости улучшите качество графиков: скорректируйте масштаб графиков, увеличьте значение параметра $Tr2$, если эксперимент завершился прежде, чем закончился переходный процесс, уменьшите значение параметра $Tr2$, если разрешение графиков оказалось слишком низким.
3. После коррекции снова запустите тестовую программу. Возможные варианты графиков переходного процесса в контуре скорости при $K_p = 0.6$, $K_i = 0$, $K_d = 0$ представлены на рис. 75. При получении качественных графиков сделайте их фото. При необходимости выделите и увеличьте участки переходных процессов (§ 4.4.1.3.2 «Управление осциллографом») и сделайте их фото.
4. При использовании ПИД-регулятора оптимальной является величина K_p , при которой переходный процесс имеет вид кривой 2 (рис. 74). Изменяя значение $K_p = Vr1$, добейтесь получения графика переходного процесса в контуре скорости, аналогичного графику 2. Это значение K_p будет оптимальным. Сделайте фото полученного графика.

Настройка дифференциальной составляющей ПИД-регулятора контура скорости

1. Имея график переходного процесса, соответствующий кривой 1 на рис. 76, задайте величину коэффициента $K_d = 0.001$ с. Сделайте скриншот полученного графика.
2. Увеличивая величину $Vr16 = K_d$ на 0.001, получите переходную характеристику, аналогичную кривой 2 на рис. 76. Сделайте скриншот графика и сравните статические ошибки для переходных характеристик 1 и 2.

Настройка интегральной составляющей ПИД-регулятора контура скорости

12. После настройки пропорциональной и дифференциальной компонент получается переходная характеристика 1, показанная на рис. 77. Интегральная компонента предназначена для того, чтобы свести статическую ошибку к 0. Задайте постоянную интегрирования $T_i = \Delta t$, т.е. $Vp2 = K_i = K_p / \Delta t$. Запустите тестовую программу. Можете получить переходную характеристику типов 2, или 3 или 4 (рис. 76). Сделайте скриншот полученной характеристики.
13. График 2 получается при чрезмерно большой величине постоянной времени интегрирования, выход на установившееся значение скорости получается очень затянутым. Задавая большую величину $Vp2 = K_i$ (уменьшая T_i), добейтесь получения технически оптимальной переходной характеристики типа 3 (рис. 77) с перерегулированием $\sigma \leq (4 \div 10)\%$ и статической ошибкой $\varepsilon_{уст} \approx 0$. Сделайте скриншот полученной переходной характеристики.
14. График 4 получается при чрезмерно малой величине T_i (чрезмерно большом K_i). Задавая меньшую величину $Vp2 = K_i$ (увеличивая T_i), добейтесь получения технически оптимальной переходной характеристики типа 3 (рис. 77). Сделайте скриншот полученной переходной характеристики.
15. Покажите полученные графики преподавателю.
16. Попросите лаборанта закрепить на рабочем столе сервопривода груз, увеличивающий приведенный к валу двигателя момент инерции в 2 раза. Масса груза рассчитывается при подготовке к лабораторной работе (п. 1.4).
17. Запустите тестовую программу и получите график переходного процесса с более инерционной нагрузкой, сделайте его скриншот.
18. Перейдите в режим плавного разгона, установив $Vp9 = 1$. Сделайте скриншоты двух осциллограмм разгона привода с увеличенным моментом инерции при ограничении ускорения $Vp5 = 10 \text{ об/с}^2$ и $Vp5 = 200 \text{ об/с}^2$. Сравните показатели качества управления.
19. Покажите преподавателю скриншоты, полученные при выполнении п. 23–25.
20. Выключите автомат силового питания сервопривода и компьютер.

Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе представляется к защите каждым студентом и должен содержать:

1. Стандартный титульный лист (Приложение).
2. Цель работы.
3. Основные характеристики используемого модуля линейных перемещений.
4. Основные характеристики используемого двигателя.
5. Исходные значения параметров сервопривода перед началом настройки контура скорости.
6. Скриншоты осциллограмм переходных процессов с обоснованием выбора параметра по показателям качества управления:
 - определение частоты дискретизации (п. 13–15);
 - настройка пропорциональной составляющей (п. 18–19);
 - настройка дифференциальной составляющей (п. 20–21);
 - настройка интегральной составляющей (п. 22–23).
7. Математическое выражение для цифрового ПИД-регулятора с полученными значениями $K_p, K_d, K_i, \Delta t_{изм} = T_{диск}$.
8. Расчет массы груза, увеличивающего приведенный к валу двигателя момент инерции в 2 раза.
9. Скриншот осциллограммы переходного процесса для сервопривода с увеличенным моментом инерции (п. 26). Сравнение показателей качества управления сервоприводом с увеличенным моментом инерции и сервоприводом на холостом ходу.
10. Скриншоты графиков плавного разгона (п. 27). Сравнение показателей качества управления при разгоне с малым и большим ускорением.
11. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите формулу для расчета приведенного к валу двигателя момента инерции.
2. Каким выражением описывается цифровой ПИД-регулятор?
3. Какие функции выполняют дифференциальная и интегральная составляющие ПИД-регулятора?
4. Дайте определение понятия «технический оптимум».
5. Какой сигнал подается на вход ПИД-регулятора для получения переходного процесса?
6. Перечислите основные показатели качества управления и правила, по которым они определяются.

6.3 Лабораторная работа № 3.

Настройка контура положения промышленного сервопривода. Асинхронная обработка событий

Цель работы – получение навыков настройки внешнего контура позиции в системе подчиненного управления сервоприводом и навыков асинхронной обработки событий по аналогии с обработчиками прерывания в языках ассемблер и СИ.

Задание на выполнение лабораторной работы

1. Подготовьтесь к выполнению лабораторной работы, изучив теоретический материал, приведенный в разделе «Подготовка к выполнению лабораторной работы № 3».
2. Освойте процедуру задания исходных значений параметров сервопривода перед настройкой контура положения.
3. Освойте настройку графического интерфейса *МотоМастер*© в режимах «Конфигурация», «Осциллограф», «Контроль» для получения графиков переходных процессов в контуре положения.
4. Получите практические навыки:
 - настройки пропорциональной и интегральной составляющих цифрового ПИ-регулятора;
 - расчета показателей качества управления;
 - определения математического выражения, связывающего входной и выходной сигналы ПИ-регулятора.
5. Получите практические навыки в асинхронной обработке событий.
 - 5.1. В соответствии с алгоритмами, представленными на рис. 78, и параметрами, заданными в табл. 21, разработайте на языке *SML* программу управления позиционированием объекта, включающую:
 - основную программу управления перемещением сервопривода в заданную координату (алгоритм на рис. 78а);
 - программу обработки события 0 при отсутствии перемещения привода в заданную координату за заданное время (алгоритм на рис. 78б).
 - 5.2. Получите скриншоты:
 - программы в окне «Контроль»;
 - графика изменения текущей позиции при отсутствии события 0;
 - графика изменения текущей позиции при обработке события 0;
6. Подготовьте отчет о выполненной работе и представьте его к защите.

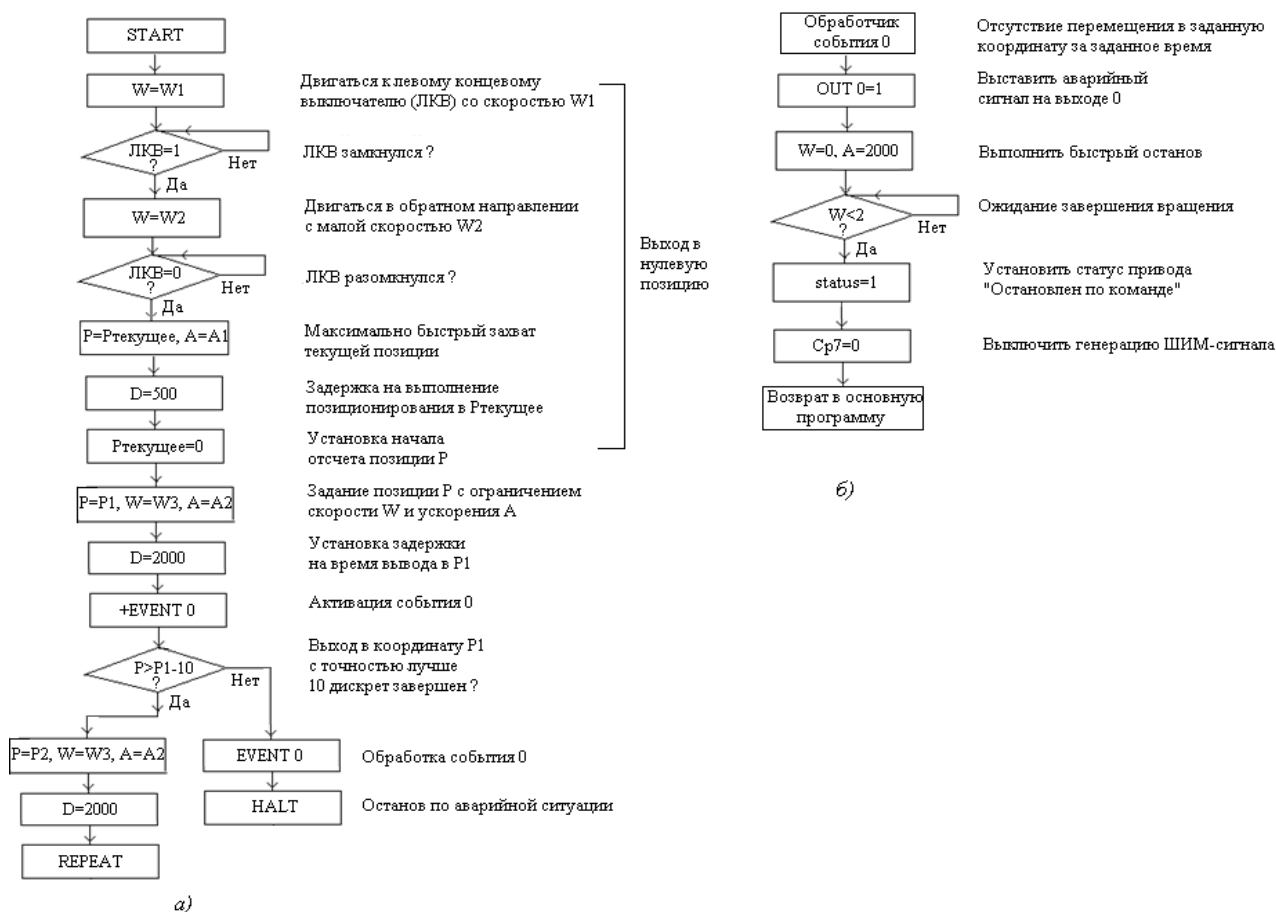


Рис. 78. Алгоритмы программы управления позиционированием привода в заданную координату с обработкой события: а – алгоритм основной программы; б – алгоритм события 0

Таблица 21. Задание параметров для программ управления позиционированием привода в заданную координату

Параметр	Бригада № 1	Бригада № 2	Бригада № 3	Бригада № 4	Бригада № 5	Бригада № 6
Позиция P1, (дискрет)	130000	150000	100000	140000	125000	120000
Позиция P2, (дискрет)	1300	1500	1000	1400	1250	1200
Скорость W1, (об/мин)	-200	-150	-300	-250	-180	-350
Скорость W2, (об/мин)	30	25	20	25	20	25
Скорость W3, (об/мин)	1200	1400	1500	1000	1100	1300
Ускорение A1, (дискрет/сек)	5000	5500	6000	4800	5200	5700
Ускорение A2, (дискрет/сек)	200	250	300	240	270	350

Подготовка к выполнению лабораторной работы № 3

- В соответствии с графиком выполнения лабораторных работ (глава 6, табл. 19):
 - студенты бригад № 1 и 4 выполняют лабораторную работу № 3 на стенде № 3 и изучают конструкцию и технические характеристики интегрированного сервопривода СПШ20-34100 (§ 4.2.1);
 - студенты бригад № 2 и 5 выполняют лабораторную работу № 3 на стенде № 1 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 750 Вт (§ 4.1.1);
 - студенты бригад № 3 и 6 выполняют лабораторную работу № 3 на стенде № 2 и изучают конструкцию и технические характеристики комплектного сервопривода СПС 25 мощностью 330 Вт (§ 4.1.2).
- Методика настройки цифрового ПИ-регулятора внешнего контура положения [24].

На всех трех лабораторных стендах во внешнем контуре положения используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор).

При ПИ-регулировании сигнал управления зависит не только от разницы между текущим и заданным значением (величины ошибки или рассогласования), а также от накопленной ошибки (интеграла). В результате ПИ-регулятор обеспечивает такое значение сигнала управления, при котором *ошибка в установившемся режиме стремится к нулю*.

Математическое выражение цифрового ПИ-регулятора:

$$Y_i = \left(K_p \cdot \varepsilon_i + K_{\text{И}} \cdot \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{\text{изм}} \right) \cdot 100\%, \quad (33)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент; ε_i – ошибка (рассогласование, разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины); $K_{\text{И}}$ – коэффициент при интегральной составляющей; $\Delta t_{\text{изм}} = t_i - t_{i-1}$ – время между соседними измерениями; $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{\text{изм}}$ – накопленная к i -му шагу сумма рассогласований (интегральная сумма).

Для цифрового ПИ-регулятора часто используется другое выражение:

$$Y_i = K_p \cdot \left[\varepsilon_i + \frac{1}{T_{\text{И}}} \cdot \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{\text{изм}} \right] \cdot 100\%, \quad (34)$$

где: $T_{\text{И}}$ – постоянная времени интегрирования.

Из формул (33) и (34) следует, что сигнал управления Y_i является суммой двух составляющих: пропорциональной (слагаемое 1) и интегральной (слагаемое 2).

Пропорциональная составляющая зависит от текущей ошибки ε_i и компенсирует текущую ошибку пропорционально ее величине.

Интегральная составляющая накапливает ошибку регулирования, что позволяет ПИ-регулятору поддерживать нулевую ошибку в установившемся режиме (устраняет статическую ошибку управления).

Соотношения между коэффициентами и постоянной времени:

$$K_{\text{И}} = K_p / T_{\text{И}}. \quad (35)$$

Поскольку настройка контура положения производится в тестовом режиме, перед ее началом рекомендуется повторить материал, изложенный в § 4.4.1.7.5 «Параметры тестирования».

Очень важный момент при настройке ПИ-регулятора – определение частоты дискретизации $f_{\text{диск}}$. Управляющее воздействие на выходе ПИ-регулятора должно быть строго периодичным, т.е. обновляться через равные промежутки времени $T_{\text{диск}} = 1 / f_{\text{диск}}$. Следовательно, с таким же интервалом $T_{\text{диск}}$ должны измеряться текущие значения регулируемой величины и вычисляться текущие значения ошибки.

Величина $T_{\text{диск}}$, в первую очередь, определяется инерционностью сервопривода.

Поскольку настройка внешнего контура (контура положения) осуществляется после настройки на технический оптимум контуров момента и скорости, используем для ПИ-регулятора внешнего контура ту же частоту дискретизации, что и для контура скорости, определенную для данного стенда в лабораторной работе № 2.

Рассмотрим настройку ПИ-регулятора на технический оптимум.

2.1. Настройка пропорциональной компоненты K_p ПИ-регулятора контура положения. Перед настройкой величины K_p :

- отключается интегральный контур, $K_{\text{И}} = K_{\text{И}2} = 0$, что соответствует максимально возможному значению постоянной времени интегрирования $T_{\text{И}}$;
- задается значение $K_p = K_{\text{п}1} = 5$ (значение параметра по умолчанию из табл. 13);
- в тестовую программу заносится значение уставки $P_{\text{сп}} = P_1$ (из табл. 21).

Запускается тестовая программа и в результате ее выполнения в окне «Осциллограф» графического интерфейса *МотоМастер*[®] появляется переходная характеристика (ее возможные варианты представлены на рис. 79).

Для переходной характеристики типа 1 величина K_p очень велика. Переходная характеристика далека от оптимальной (колебания с амплитудой ΔP), величину K_p следует уменьшить.

В переходной характеристике типа 2 наблюдаются затухающие колебания (5–6 периодов).

В переходной характеристике 3 наблюдается небольшой выброс (перерегулирование) и быстро затухающие колебания (1–2 периода). Этот тип переходной характеристики обеспечивает хорошее быстродействие и быстрый выход на заданную скорость. В большинстве случаев его можно считать оптимальным, если в системе допускаются выбросы при переходе с одной скорости на другую.

Выбросы устраняются дополнительным уменьшением K_p так, чтобы получилась переходная характеристика типа 4. Скорость плавно подходит к установившемуся значению без выбросов и колебаний, однако быстродействие регулятора снижено.

В переходной характеристике типа 5 сильно затянутый подход к установившемуся значению говорит о том, что величина K_p мала. Динамическая и статическая точность регулирования здесь малы.

Следует обратить внимание на два обстоятельства.

Во-первых, во всех переходных характеристиках на рис. 79 установившееся значение положения не совпадает со значением уставки P_{sp} . Чем меньше величина K_p , тем больше остаточное рассогласование $\varepsilon_5 > \varepsilon_4 > \varepsilon_3 > \varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

Во-вторых, длительность переходных процессов тем больше, чем меньше величина K_p .

Таким образом, нужно стремиться выбирать величину K_p как можно больше. Остаточное рассогласование ε_i , характерное для чисто пропорциональных регуляторов (П-регуляторов), убирается интегральной компонентой ПИ-регулятора.

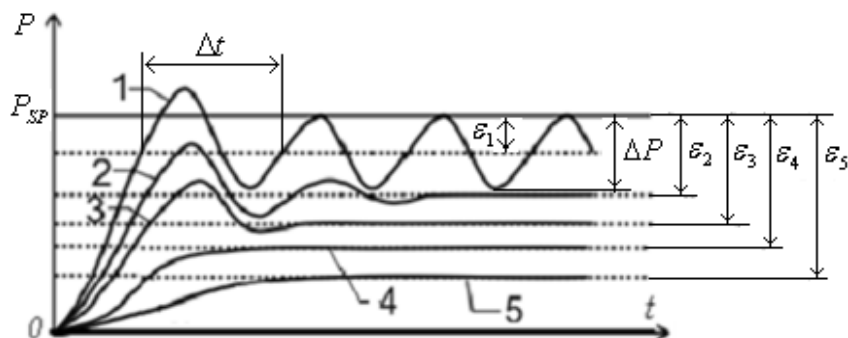


Рис. 79. Возможные виды переходных характеристик при определении величины K_p

При использовании ПИ-регулятора оптимальной является величина K_p , при которой переходный процесс имеет вид кривой 3.

2.2. Настройка интегральной компоненты K_I . Итак, после настройки пропорциональной компоненты получается переходная характеристика 1, показанная на рис. 80.

Интегральная компонента предназначена для того, чтобы убрать остаточное рассогласование между установившимся в системе значением скорости и уставкой (свести ошибку ε к 0).

Начинать настраивать постоянную времени интегрирования следует с величины $T_I = \Delta t$, т.е. с задания величины коэффициента $K_I = K_p / T_I = K_p / \Delta t$.

Переходная характеристика типа 2 (рис. 80) получается при чрезмерно большой величине постоянной времени интегрирования. Выход на установившееся значение скорости получается очень затянутым.

Переходная характеристика типа 4 (рис. 80) получается при слишком малой величине постоянной времени интегрирования (слишком большой величине коэффициента K_I). Если величину T_I уменьшить еще, то в системе могут возникнуть колебания.

Уменьшая коэффициент K_I , получаем технически оптимальную переходную характеристику типа 3 (рис. 80) с перерегулированием $\sigma \leq (4 \div 10)\%$ (рис. 60, § 4.3).

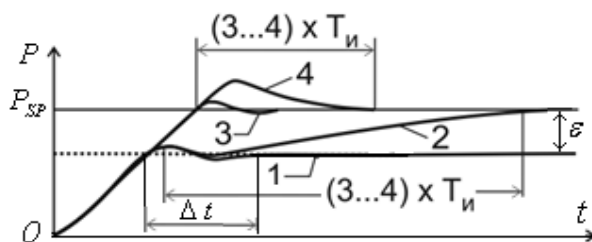


Рис. 80. К определению интегральной компоненты $K_{\text{и}}$

3. Определение показателей качества управления.

Перед определением показателей качества управления по графикам переходных процессов рекомендуется повторить материал, изученный при подготовке к лабораторной работе № 2, а именно, п. 3 параграфа «Подготовка к лабораторной работе № 2».

4. Асинхронная обработка событий.

Перед выполнением работы необходимо изучить материал, изложенный в § 5.2.5 «События». Перед написанием программы на языке *SML* изучите *Программы 10* и *11*, приведенные в указанном параграфе. В обработчик события 0 (аварийная ситуация при не перемещении сервопривода в заданную координату за заданное время) включите команды из обработчика события в *Программе 11*, используемые при обработке аварийных ситуаций.

Порядок выполнения работы

- Изучите обязательные требования по обеспечению безопасной работы с сервоприводами, изложенные в главе 6, и пройдите инструктаж по технике безопасности.
- Перед началом работы управляющий компьютер и автомат включения силового питания сервопривода должны быть выключены.
- Ответьте на вопросы преподавателя по конструкции сервопривода и расположению его частей на стенде.
- Включите управляющий компьютер и с его рабочего стола войдите в программу *МотоМастер*®, используя соответствующий ярлык.
- Включите силовое питание сервопривода.
- Примерно через одну минуту после включения силовой части на контрольной панели интерфейса программы *МотоМастер*® с помощью мышки включите клавишу 1 (рис. 62) поиска сервопривода. После его нахождения инициализируется кнопка 2 контрольной панели, щелкните по ней левой кнопкой мыши для открытия графического интерфейса программы *МотоМастер*® для выбранного сервопривода (рис. 61).
- В окне «Конфигурация» графического интерфейса программы *МотоМастер*® (§ 4.4.1, рис. 61) перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур тока (момента)» (§ 4.5.1, табл. 13). Замкните контур тока, установив параметр $Cp5$ в состояние «Замкнут». Значения параметров $Cp1$ и $Cp2$ устанавливаются по указанию преподавателя. Остальные параметры должны иметь значения, приведенные в графе «По умолчанию» табл. 13.
- Перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур скорости» (§ 4.5.1, табл. 13). Замкните контур скорости, установив параметр $Vp7$ в состояние «Замкнут». Установите максимально допустимую скорость вращения $Vp8 = 4500$ об/мин. Для анализа качества переходного процесса отключите режим плавного разгона, установив параметр $Vp9 = 2$ «Режим с максимальной динамикой». Установите определенные при выполнении лабораторной работы № 2 значения: частоты дискретизации (параметр $Vp4$), пропорционального коэффициента (параметр $Vp1$), интегрального коэффициента (параметр $Vp2$), дифференциального коэффициента (параметр $Vp16$). Остальные параметры контура скорости должны иметь значения, приведенные в графе «По умолчанию» табл. 13.
- Перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур позиции» (§ 4.5.1, табл. 13). Замкните контур позиции, установив параметр $Pp5$ в состояние «Замкнут». Установите определенное при выполнении лабораторной работы № 2 значение частоты дискретизации (параметр $Pp3$).

Установите значения коэффициентов для контура положения: пропорционального $K_P = Pp1 = 5$, интегрального $K_I = Pp2 = 0$.

10. В окне «Конфигурация» графического интерфейса программы *МотоМастер*® перейдите к вкладке «Параметры тестирования» (§ 4.5.5, табл. 17).

Установите параметры: $Tr1 = 2$ («Ступенька/Приращение позиции»); период опроса требуемых параметров $Tr2 = 1000$ мкс; тогда длительность всего эксперимента составит $Tr2 \cdot 3000 = 3$ с.

11. Перейдите в окно «Осциллограф», выберите каналы тестирования «Текущее положение» и «Текущая скорость вращения», для каждого канала задайте цвет графика, для графика скорости выберите множитель 35 (§ 4.4.1.3).

Настройка пропорциональной составляющей ПИ-регулятора контура положения

1. Перейдите в окно «Контроль» и из банка памяти, указанного преподавателем, выберите тестовую программу (§ 4.4.1.4, рис. 69). После ее перемещения в поле «Редактирование» в текст программы внесите заданную координату позиционирования $P_{sp} = P1$ (из табл. 21). Верните программу обратно в поле «Банк программ» и запустите тест, кликнув на клавишу . В тестовой программе предусмотрена задержка 2.5 сек. на начало выполнения, необходимая на запуск осциллографа. Поэтому быстро перейдите в окно «Осциллограф» и кликните на клавишу «Старт».
2. Дождитесь отображения графиков на экране и кликните на клавишу «Стоп» в окне «Осциллограф». При необходимости улучшите качество графиков: скорректируйте масштаб графиков, увеличьте значение параметра $Tr2$, если эксперимент завершился прежде, чем закончился переходный процесс, уменьшите значение параметра $Tr2$, если разрешение графиков оказалось слишком низким.
3. После коррекции снова запустите тестовую программу. Возможные варианты полученного графика переходного процесса в контуре положения при $K_P = 5$, $K_I = 0$ представлены на рис. 79. При получении качественных графиков сделайте их фото. При необходимости выделите и увеличьте участки переходных процессов (§ 4.4.1.3.2 «Управление осциллографом») и сделайте их фото.
4. При использовании ПИ-регулятора оптимальной является величина K_P , при которой переходный процесс имеет вид кривой 3 (рис. 79). Изменяя значение K_P , добейтесь получения графика переходного процесса в контуре положения, аналогичного графику 3. Это значение K_P будет оптимальным. Сделайте фото полученного графика.

Настройка интегральной составляющей ПИ-регулятора контура положения

1. После настройки пропорциональной компоненты получается переходная характеристика 1, показанная на рис. 80. Интегральная компонента предназначена для того, чтобы свести статическую ошибку к 0. Задайте постоянную интегрирования $T_I = \Delta t$, т.е. $Pp2 = K_I = K_P / \Delta t$. Запустите тестовую программу. Можете получить переходную характеристику типа 2 (рис. 80), где выход на установившееся значение скорости получается очень затянутым. Такая характеристика получается при чрезмерно большой величине постоянной времени интегрирования. Сделайте фото полученного переходного процесса.
2. Задавая большую величину $Vp2 = K_I$ (уменьшая T_I), добейтесь получения технически оптимальной переходной характеристики типа 3 (рис. 80) с перерегулированием $\sigma \leq (4 \div 10)\%$ и статической ошибкой $\varepsilon_{уст} \approx 0$. Сделайте фото полученной переходной характеристики.
3. Покажите полученные графики преподавателю.

Асинхронная обработка событий

(текст программы управления позиционированием с обработкой события должен быть проверен преподавателем и размещен в соответствующем банке).

1. В окне «Конфигурация» перейдите к вкладке «Статические параметры/Контур скорости» и установите параметр $Vp9 = 1$ «Режим плавного разгона».
2. Перейдите в окно «Осциллограф», выберите канал тестирования «Текущее положение» и задайте цвет графика.

3. В окне «Контроль» извлеките из соответствующего банка разработанную вами программу управления позиционированием с обработкой события. Запустите ее и в окне «Осциллограф» получите график изменения текущего положения без отработки события 0. Сделайте его фото.
4. В окне «Контроль» уменьшите заданную координату позиционирования на 1000 отсчетов (чтобы произошло событие 0) и запустите программу. Сделайте фото графика с аварийным остановом привода.
5. Покажите полученные при выполнении п. 25–26 фото преподавателю.
6. Выключите автомат силового питания сервопривода и компьютер.

Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе представляется к защите каждым студентом и должен содержать:

1. Стандартный титульный лист (Приложение).
2. Цель работы.
3. Основные характеристики используемого модуля линейных перемещений.
4. Основные характеристики используемого двигателя.
5. Исходные значения параметров сервопривода перед началом настройки контура положения.
6. Скриншоты осциллограмм переходных процессов с обоснованием выбора параметра по показателям качества управления:
 - настройка пропорциональной составляющей контура положения (п. 12–15);
 - настройка интегральной составляющей контура положения (п. 16–17).
7. Математическое выражение для цифрового ПИ-регулятора с полученными значениями $K_P, K_D, K_I, \Delta t_{\text{изм}} = T_{\text{диск}}$.
8. Скриншот текста программы управления позиционированием с обработкой события в окне «Контроль».
9. Скриншоты графиков изменения текущей позиции при отсутствии обработки события 0 и при обработке событий 0.
10. Выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Каким выражением описывается цифровой ПИ-регулятор?
2. Дайте определение параметра «Частота дискретизации».
3. Какие функции выполняют пропорциональная и интегральная составляющие ПИ-регулятора?
4. Почему процесс обработки события называется асинхронным?
5. Каким образом активируется событие, обрабатываемое перед выполнением основной программы?
6. Какими командами должна заканчиваться основная программа, если далее следует текст программы обработки события 0?

Библиографический список

1. Автоматические регуляторы приводов переменного тока (преобразователи частоты) серии «Универсал» с интеллектуальной системой управления. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/01-0309-00.pdf>.
2. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2004. – с.: ил.
3. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 752 с.: ил.
4. Векторное управление двигателем. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/>.
5. Выбор преобразователя частоты. – Электрон. дан. – http://www.esspb.ru/Documents/vybrat_P.pdf.
6. Высокоточные приводы, сервоприводы и системы ЧПУ Siemens. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovateli/Servo/index_servo.htm.
7. Гибридный шаговый двигатель. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://robotosha.ru/electronics/how-stepper-motors-work.html>.
8. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод : учеб. пособие для академического бакалавриата / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2016. – 223 с. – Серия : Университеты России.
9. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.: ил.
10. Документация по линейным модулям СТМ-2 и СТМУ-2. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/doc/ctm-doc.html>.
11. Дьяконов, В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В.П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.
12. Евсиков, А. А. Системы управления оборудованием в автоматизированном производстве : учебное пособие / А.А. Евсиков, В.А. Коковин, А.П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2018. – 139 [1] с.
13. Евсиков, А. А. Об использовании системы моделирования *VisSim* для исследования электропривода, работающего при скалярном управлении в повторно-кратковременном номинальном режиме с частыми пусками и электрическим торможением / А.А. Евсиков, А.П. Леонов // Известия института инженерной физики. – 2019. – № 1. – С. 42–48.
14. ЗАО «Завод мехатронных изделий». – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/catalog.html>.
15. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода : учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.: ил.
16. Интегрированный сервопривод серии СПШ и СПС. Описание параметров, версия 5.1. – ЗАО «Сервотехника», 2013. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/doc/servoprivod-doc.html>.
17. Интегрированный сервопривод СПШ. Руководство пользователя, версия 3.2. – ЗАО «Сервотехника», 2011. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/doc/spsh-doc.html>.
18. Кацман, М. М. Электрический привод / М.М. Кацман. – 4-е изд., стер. Москва : Академия, 2011. – 384 с.
19. Коголь, И. М. Асинхронные машины. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://model.exponenta.ru/electro/0080.htm>.
20. Леонов, А. П. Выбор исполнительных двигателей для электрических приводов производственных механизмов : учебное пособие / А.П. Леонов. – Москва : Прометей, 2013. – 139(1) с.: ил.
21. Левкин, Д. Трехфазный асинхронный двигатель. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction3ph/>.
22. Макаров, Д. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://www.asutpp.ru/asinxronnyj-dvigatel-s-korotkozamknuty-m-rotorom.html>.
23. Мейстель, А. М. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Динамическое торможение приводов с асинхронными двигателями / А.М. Мейстель ; под ред. М.Г. Чиликина. – Москва : Ленинград : Энергия, 1967. – 136 с.: ил.
24. Методика настройки цифрового ПИД-регулятора. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.automatix.ru/articles/?id=29244>.
25. Модули линейного перемещения AP-1. – Электрон. дан. – Режим доступа : http://zaozmi.ru/linear_modules.html.
26. Москаленко, В. В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В.В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.: ил.
27. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
28. Принцип действия асинхронного двигателя. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://eprivod.com/princip-dejstva-asinxronnogo-dvigatelya>.
29. Скалярное управление двигателем. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/scalar/>.

30. Сервопривод серии СПС 25. Руководство пользователя, версия 4.8. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/doc/servoprivod-doc.html>.
31. Серия МР110/МРУ110 – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://servotechnica.ru/files/others/mr110-mru110.pdf>.
32. Темирев, А. П. Контроллеры МК11.3 для высокопроизводительных систем прямого цифрового управления двигателями / А.П. Темирев, В.Ф. Козаченко, Н.А. Обухов, А.С. Анучин, С.А. Трофимов. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://motorcontrol.ru/wp-content/uploads/2015/11/МК11_3.pdf.
33. Тормозные режимы СД. Механические характеристики СД в тормозных режимах. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://life-prog.ru/1_28050_tormoznie-rezhimi-sd-mehanicheskie-harakteristiki-sd-v-tormoznih-rezhimah.html.
34. Характеристики частотных преобразователей ES024 от 1,5 до 315 кВт. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://www.softstarter.ru/catalog/invertors/>.
35. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода : учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – 6-е изд., доп. и перераб. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 576 с.: ил.
36. Шаговый двигатель – принцип работы. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://24techno-guide.ru/shagovii-dvigatel---princip-raboti.php>.
37. Язык программирования СПШ и СПС. – Электрон. дан. – Режим доступа : <http://zaozmi.ru/doc/sps-doc.html>.
38. Astrom, K. J. PID controllers: theory, design and tuning / K.J. Astrom, T. Hugging. – 2 nd Edition. – Instrument Society of America, 1995. – 343 pp.
39. Bial Akin, Nishant Garg. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors // Application report. SPRABQ8.- Dallas, USA.:Texas Instruments.
40. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. – 1972. – Vol. 34, no. 1. – P. 217–220.
41. Hasse K. Drehzahlgeverfahren fur schnelle Umkehrantriebe mit strom-richtergergespeisten Asynchron-Kurzschlusslaufermotoren // Regelungstechnik. – 1972. – Vol. 20, no. 2. – P. 60–66.
42. http://elprivod.nmu.org.ua/ru/entrant/What_is_mehatronics.php.
43. <http://model.exponenta.ru>.
44. http://wiki.amperka.ru/робототехника:сервоприводы#понятие_сервопривода.
45. Kazmierkowski, M. P. High-Performance Motor Drives / Marian P. Kazmierkowski, Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon. // IEEE Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 5, no. 3. – P. 6–26.

Приложение

Титульный лист к отчету по лабораторной работе

***Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области «Университет «Дубна»,
филиал «Протвино»***

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

Лабораторная работа №

по дисциплине «Автоматизированный электропривод»

на тему: «_____»

(направление 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»)

Выполнил студент 4-го курса группы _____

ФИО полностью

Оценка: _____

Дата защиты: _____

Подпись преподавателя _____

г. Протвино, 20__

Учебное издание

Евсиков Александр Александрович
Коковин Валерий Аркадьевич
Леонов Анатолий Петрович

Автоматизированный электропривод с частотным управлением
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор Ю. С. Цепилова
Технический редактор Ю. С. Цепилова
Компьютерная верстка Ю. С. Цепилова
Корректор Ю. С. Цепилова

Подписано в печать . Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 15,25.
Тираж экз. Заказ № 3.

ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»
141980, г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19