

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных  
машиностроительных производств»

Допускаю к защите

И.О. Зав.кафедрой \_\_\_\_\_ А.В. Приемшев

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ  
ТОКАРНОГО СТАНКА

Направление: 15.03.04 «АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ»

Профиль: 15.03.04\_01 «Автоматизация технологических процессов и  
производств»

Выполнил  
студент группы 343329/2

М. С. Колесникова

Руководитель  
к.т.н., доцент

А. Е. Епишкин

Рецензент  
Исполнительный директор ЗАО "НПП "ЭПРО"  
к.т.н., доцент

В. А. Шаряков

Санкт-Петербург  
2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ .....	3
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	8
1.1. Требования к электроприводу подачи .....	8
1.2. Выбор типа электропривода.....	8
1.3. Выбор электродвигателя.....	11
1.4. Выбор силового преобразователя .....	15
1.5. Определение характеристик силовых элементов.....	18
2. КОМПОНОВКА СЭП .....	19
2.1. Выбор структуры САУ ЭП .....	19
2.2. Построение функциональной схемы САУ.....	19
2.3. Компоновка оборудования СЭП.....	23
2.4. Выбор энкодера.....	26
3. СИНТЕЗ И РАСЧЕТ ДИНАМИКИ СЭП С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ .....	34
3.1. Составление передаточных функций звеньев СЭП .....	34
3.2. Построение структурной динамической модели и синтез регуляторов .....	37
3.3. Исследование динамики СЭП .....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	49

## **АННОТАЦИЯ**

Колесникова Марина Сергеевна

группа з43329/2

### **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ ТОКАРНОГО СТАНКА**

### **AUTOMATIC ELECTRIC DRIVE FEED LATHE**

В работе проведен расчет системы электропривода подачи токарного станка на базе вентильного двигателя. Выполнен расчет статики и динамики системы. Проведена оптимизация динамики. Выполнено имитационное моделирование динамики синтезированного привода с учетом упругих звеньев.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АРФ – активный режекторный фильтр

Д – двигатель

ДС – датчик скорости

ЗС – задатчик скорости

ЛЧХ – логарифмическая частотная характеристика

ЛАХ – логарифмическая амплитудная характеристика

ЛФХ – логарифмическая фазовая характеристика

ОМ – оптимум по модулю (настройка контура регулирования)

ПИ – пропорционально-интегральный (закон управления)

РС – регулятор скорости

РТ – регулятор тока

СО – симметричный оптимум (настройка контура регулирования)

САР – система автоматического регулирования

САУ – система автоматического управления

СЭП – систем электропривода

ТП – тиристорный преобразователь

ШИМ (PWM) – широтно-импульсная модуляция

## ВВЕДЕНИЕ

Основные технологические требования к металлорежущим станкам заключаются в обеспечении: необходимых технологических режимов обработки с использованием современного режущего инструмента; максимальной производительности; требуемой поверхности (снижение шероховатости); повторяемости размеров деталей в обрабатываемой партии [5].

При всем многообразии станков требования, предъявляемые к приводам станков, определяются, главным образом, не тем, к какой группе относится станок, а для какого движения предназначен привод: главного движения, подачи или вспомогательного, так как именно это определяет мощность и момент, способ регулирования скорости, диапазоны регулирования, необходимую плавность регулирования, требования к динамическим характеристикам, к жесткости механических характеристик и стабильности скорости.

Расширение технологических возможностей станков, и в первую очередь многоцелевых станков (обрабатывающих центров), обеспечило возможность проведения на одном станке различных технологических режимов: фрезерование, сверление и растачивание или точение, сверление и растачивание и т. д., а освоение нового твердосплавного и керамического инструмента существенно повысило режимы обработки [5].

Удовлетворение требованиям снижения шероховатости и повышения точности при обработке и позиционировании ужесточило требования к электроприводам по значению погрешностей в установившихся и переходных режимах при различных возмущающих воздействиях, по расширению диапазона регулирования и увеличению чувствительности электроприводов по входному воздействию и нагрузке, по повышению равномерности движения, особенно при малых скоростях, по увеличению быстродействия при возмущении по нагрузке и при реверсе под нагрузкой на малой скорости.

Появление низкоскоростных высокомоментных двигателей умеренных габаритов позволило существенно сократить механическую часть коробки подач, а в ряде случаев полностью ее исключить, установив исполнительный двигатель непосредственно на ходовой винт.

Исключение коробки подач привело к повышению мощности механической передачи, повышению КПД и снижению момента инерции электромеханического привода. В станках возросла составляющая от резания в общей нагрузке приводов подач. В большинстве современных станков нагрузка на двигатель при рабочих подачах без резания составляет не более 20–30% номинальной. Рост составляющей от сил резания в общей нагрузке на привод подачи увеличил колебание нагрузки на электроприводе подачи при резании, что ужесточило требования к статической и динамической жесткости привода подачи.

Увеличение скорости быстрых перемещений и снижение скорости установочных перемещений привели к значительному увеличению диапазона регулирования. Максимальная рабочая подача современных многоцелевых станков составляет 30–50% скорости быстрых перемещений.

Полный диапазон регулирования подач в станках фрезерной, расточной и токарной групп составляет 100–10000, а в карусельных расширяется до 30000–40000. Теоретически диапазон регулирования привода подачи каждой оси в станках с ЧПУ при контурном фрезеровании бесконечен (например, при обработке окружности). Реально минимальная подача ограничена чувствительностью электропривода.

Скорость быстрых перемещений зависит от характеристик механической части привода, возможностей системы ЧПУ (в частности, от максимальной частоты сигнала управления приводом от системы ЧПУ), дискретности управления, максимальной угловой скорости приводного электродвигателя, коэффициента редукции передачи от двигателя к механизму и других ограничений, вносимых системой ЧПУ.

Минимальная скорость привода определяется технологическими требованиями, дискретностью управления и чувствительностью электропривода. Особо высокие требования предъявляются к динамическим характеристикам привода по управляющему и возмущающему воздействиям. Неудовлетворительные динамические свойства регулируемого электропривода, особенно при возмущении по нагрузке, являются причиной повышенной шероховатости поверхности, поэтому весьма важно обеспечить высокое быстродействие привода при сбросе и набросе нагрузки, а также реверсе двигателя под нагрузкой на самых малых скоростях [5].

При проектировании и применении станочных электроприводов в каждом конкретном случае удовлетворение одних требований достигается за счет других. В силу этого для правильного выбора электроприводов станков очень важно иметь возможно более полный перечень характеристик применяемых электроприводов, и в первую очередь по отмеченным предъявляемым требованиям. Только комплексный анализ технологических требований и конструктивных возможностей станков может обеспечить корректный выбор электропривода.

Целью дипломного проекта является разработка автоматизированного электропривода подачи токарного станка, с требуемыми динамическими показателями.

Для достижения цели в дипломном проекте решаются следующие задачи:

- 1) Расчет и выбор силовых элементов, включая обзор, сравнительный анализ технических характеристик современных элементов электропривода.
- 2) Компоновка и расчет статики САУ
- 3) Синтез и расчет динамики САУ
- 4) Имитационное моделирование динамики привода

# 1. РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## 1.1. Требования к электроприводу подачи

К электроприводам подачи станков предъявляются следующие основные требования [2]:

- минимальные размеры электродвигателя при высоком вращающем моменте;
- высокая максимальная скорость;
- значительная перегрузочная способность привода в режимах кратковременной и повторно–кратковременной нагрузки;
- широкий диапазон регулирования;
- высокая стабильность характеристик;
- высокое быстродействие при разгоне и торможении, подключении и отключении нагрузки и при реверсе под нагрузкой во всем диапазоне частот вращения;
- высокая равномерность движения при различной нагрузке во всем диапазоне частот;
- высокая надежность и ремонтпригодность;
- удобство конструктивной установки двигателя на станке и встраивания управляемых преобразователей в шкафы и ниши станков.

## 1.2. Выбор типа электропривода

Одной из наиболее характерных черт развития современного автоматизированного электропривода является переход от систем регулируемого электропривода на базе двигателей постоянного тока к регулируемым электроприводам переменного тока.

Основным недостатком двигателей постоянного тока является наличие трущегося токосъемного щеточно-коллекторного узла, снижающего



надежность машины и накладывающего ограничения на возможность работы в условиях агрессивной окружающей среды. Наличие щеточно-коллекторного узла отрицательно сказывается на работе двигателей в условиях автоматизированных производственных систем, так как требует проведения регулярных профилактических осмотров и ремонтов. Кроме того, щеточно-коллекторный узел не позволяет полностью автоматизировать производство электродвигателей постоянного тока и ограничивает их выпуск. В силу всех этих факторов в последнее время всеми ведущими электротехническими фирмами ведутся работы по созданию широкорегулируемых станочных электроприводов с двигателями переменного тока. Отсутствие трущихся электромеханических токоведущих узлов позволяет устанавливать эти двигатели в условиях любой окружающей среды, повысить их надежность и полностью удовлетворить потребности промышленности вследствие возможности полной автоматизации их производства [5].

Бесколлекторные двигатели требуют минимального обслуживания, что позволяет их устанавливать на станки, работающие в гибких производственных системах. Исполнение этих двигателей в бескорпусном варианте с шихтованной станиной и «холодным» ротором позволяет снизить их габаритные размеры и уменьшить передачу тепла от электродвигателя на станок.

Разработка бесколлекторных (бесщеточных) двигателей ведется в двух направлениях – создание специальных синхронных и асинхронных электродвигателей. Синхронным или вентильным электродвигателям свойственны все регулировочные достоинства электродвигателей постоянного тока.

В бесщеточных двигателях коллектор заменен бесконтактным коммутатором на транзисторах или тиристорах. Двигатель оснащен бесколлекторным тахогенератором и достаточно простым датчиком угла поворота для коммутации тока в обмотках статора в зависимости от числа полюсов и геометрического положения ротора. Регулирование скорости

подобных синхронных двигателей осуществляется изменением напряжения на статоре, так же как и в двигателях постоянного тока. Вследствие этого преобразователи, питающие бесколлекторные (вентильные) двигатели, достаточно просты и надежны.

Существуют две основные системы регулируемых электроприводов переменного тока: асинхронный частотно-регулируемый электропривод на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей и полупроводниковых преобразователей частоты типа автономных инверторов и синхронный регулируемый электропривод (вентильный двигатель) на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами (для электроприводов мощностью до 40 кВт) или с электромагнитным возбуждением (для более мощных приводов) и полупроводниковым преобразователем частоты.

Первая система электропривода более универсальна и находит применение во всех областях машиностроения. Вторая применяется главным образом в двух случаях: для прецизионных моментных электроприводов, осуществляющих обработку положения рабочего органа, и для высокоскоростных электроприводов, в том числе большой мощности. Целесообразность использования вентильных двигателей для систем позиционирования обусловлена высокой перегрузочной способностью этих двигателей, что обеспечивает хорошую динамику процесса управления, а для высокоскоростных механизмов (свыше 3000 об/мин) связана с конструктивными особенностями синхронных машин, которые могут быть выполнены на большие частоты вращения. В остальных случаях предпочтение чаще отдается частотно-регулируемым асинхронным двигателям.

Наблюдается тенденция сближения систем частотно-регулируемого асинхронного и электропривода с вентильным двигателем. Для этих систем используются аналогичные методы математического описания, одинаковые по структуре системы регулирования, близкие по аппаратному содержанию полупроводниковые преобразователи и системы управления. Это способствует

унификации электроприводов с различными двигателями переменного тока, что упрощает их производство и эксплуатацию.

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, называемые иногда также двигателями с электронной коммутацией или бесщеточными (бесконтактными) двигателями постоянного тока, вентильными двигателями. Еще одно название закрепилось за этими машинами, предназначенными для работы в области низких и сверхнизких скоростей вращения, - бесконтактные моментные двигатели (БМП).

Данные двигатели сочетают в себе преимущества машин постоянного тока, имея разнообразные механические характеристики, регулировочные свойства и бесконтактность конструкции асинхронных машин. Использование данных двигателей в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к серводвигателям.

Их статор можно сравнивать со статором асинхронного двигателя. Шихтованный ротор имеет наклеенный магнит, который обеспечивает постоянное магнитное поле ротора. Двигатели обычно изготавливают в закрытом исполнении (IP65) с самовентиляцией.

### 1.3. Выбор электродвигателя

Кинематическая схема силовой части электропривода подачи представлена на рис. 1.1, где обозначены: М – электродвигатель привода; Р – промежуточный редуктор; ХВ – ходовой винт; С – суппорт; И – инструмент обработки.

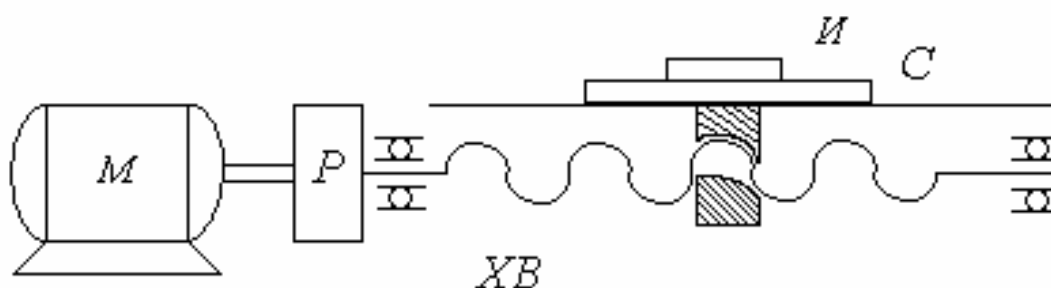


Рис. 1.1. Кинематическая схема привода подачи

Усилие подачи

$$F_{II} = k_{3II} F_X + m(F_Y + F_Z + G_{\Sigma}) + gS \quad (1.1)$$

$$F_{II} = 0,7 \cdot 30000 + 0,19 \cdot (30000 + 120000 + 1700) + 0,3 \cdot 12000 = 53423 \text{ Н}$$

Момент на ходовом винте

$$M_{XB} = \frac{F_{II} d_{XB} \operatorname{tg}(a + b)}{2} \quad (1.2)$$

$$M_{XB} = \frac{53423 \cdot 0,059 \cdot \operatorname{tg}(6 + 4)^\circ}{2} = 277,9 \text{ Нм}$$

Шаг ходового винта

$$h = p d_{XB} \operatorname{tg} a \quad (1.3)$$

$$h = 3,14 \cdot 59 \cdot \operatorname{tg} 6^\circ = 19,47 \text{ мм/об}$$

Угловая скорость ходового винта

$$w_{XB} = \frac{V_{II\text{MAX}}}{9,55h} \quad (1.4)$$

$$w_{XB} = \frac{600}{9,55 \cdot 19,47} = 3,23 \text{ с}^{-1}$$

Задавшись значением номинальной скорости  $w_{дн}$  двигателя для выбранной серии серводвигателей производства фирмы MITSUBISHI ELECTRIC, можно в первом приближении определить необходимое передаточное число редуктора

$$i_P = \frac{w_{дн}}{w_{XB}} = \frac{209,4}{3,23} = 64,8 \approx 65 \quad (1.5)$$

Момент на валу двигателя

$$M_D = \frac{M_{XB}}{i_P h_{XB} h_P} = \frac{277,9}{65 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 5,938 \text{ Нм} \quad (1.6)$$

Требуемая мощность двигателя

$$P_D = M_D w_{дн} = 5,938 \cdot 209,4 = 1,243 \text{ кВт} \quad (1.7)$$

Выбираемый двигатель должен удовлетворять следующим условиям:

1. Пиковый момент не должен превышать утроенного значения пускового момента  $M_{\Pi}$ .
2. Вращающий момент при работе без принудительного охлаждения не должен превышать значения  $M_{\Pi}$

Для применения в различных объектах автоматизации фирмой MITSUBISHI ELECTRIC производятся серии вентильных двигателей с различными моментами инерции (см. табл. 1.1) По таблице выберем серию S, отличающуюся средним моментом инерции, что обеспечит улучшенное соотношение инерционных масс двигателя и механизма

Таблица 1.1.

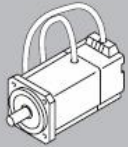

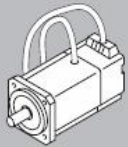
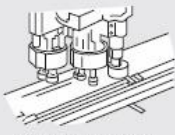
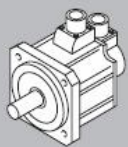

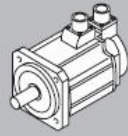
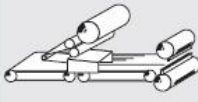
Обозначение модели	Свойства	Пример приложения	
<b>K</b> 	<b>Низкая инерция</b> Большой момент инерции двигателя делает его хорошо подходящим для механизмов с колеблющимся моментом инерции нагрузки или механизмов с низкой жесткостью, таких как конвейеры.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Конвейеры</li> <li>● Механизмы приготовления пищи</li> <li>● Принтеры</li> <li>● Небольшие загрузчики и разгрузчики</li> <li>● Небольшие роботы и устройства узловой сборки</li> <li>● Небольшие координатные столы</li> <li>● Небольшие загрузочные устройства прессов</li> </ul>	 Небольшие роботы
<b>M</b> 	<b>Сверхнизкая инерция</b> Небольшой момент инерции двигателя делает его хорошо подходящим для высоко-динамичных операций позиционирования с предельно малыми временами цикла.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Устройства для вставки, монтажа, загрузки</li> <li>● Устройства открытия отверстий на печатной плате</li> <li>● Внутрисхемные тестеры</li> <li>● Принтеры этикеток</li> <li>● Вяжущие и вышивающие машины</li> <li>● Сверхмалые роботы и исполнительные органы роботов</li> </ul>	 Устройства для вставки, монтажа, загрузки
<b>S</b> 	<b>Средняя инерция</b> Стабильное управление, осуществляемое от низких до высоких скоростей, позволяет работать в широком диапазоне приложений (например, прямое соединение с шариковой винтовой парой).	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Конвейерные механизмы</li> <li>● Специализированные механизмы</li> <li>● Роботы</li> <li>● Загрузчики и разгрузчики</li> <li>● Подъемные механизмы и устройства натяжения</li> <li>● Револьверные головки станков</li> <li>● Координатные столы</li> <li>● Проверочные устройства</li> </ul>	 Подъемные механизмы и устройства натяжения
<b>R</b> 	<b>Низкая инерция</b> Компактная модель с низким моментом инерции и средней мощностью. Хорошо подходит для высокочастотной работы.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Вальцовые подающие механизмы</li> <li>● Загрузчики и разгрузчики</li> <li>● Высокочастотные конвейерные механизмы</li> </ul>	 Заверточный механизм

Таблица 1.2.

Модель сервоусилителя		HC-SFS52 (B)②	HC-SFS102 (B)②	HC-SFS152 (B)②	HC-SFS202 (B)②	HC-SFS352 (B)②	HC-SFS502 (B)②	HC-SFS702 (B)②
Модель сервоусилителя		MR-J2S-60A/B	MR-J2S-100A/B	MR-J2S-200A/B	MR-J2S-200AB	MR-J2S-350A/B	MR-J2S-500A/B	MR-J2S-700A/B
Мощность источника питания ①		1.0	1.7	2.5	3.5	5.5	7.5	10
Непрерывные характеристики	Номинальная мощность [Вт]	0.5	1.0	1.5	2.0	3.5	5.0	7
	Номинальный вращающий момент [Нм]	2.39	4.78	7.16	9.55	16.7	23.9	33.4
Макс. вращающий момент [Нм]		7.16	14.4	21.6	28.5	50.1	71.6	100
Номинальная скорость вращения [об/мин]		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Максимальная скорость вращения [об/мин]		3000	3000	3000	2500	2500	2000	2000
Допустимая мгновенная скорость вращения		3450	3450	3450	2850	2850	2300	2300
Номинальный ток [А]		3.2	6	9	11	17	28	35
Макс. ток [А]		9.6	18	27	33	51	84	105
Тормозная частота регенерации [1/мин] ③	Без дополнительного резистора	56	54	136	64	31	39	32
	MR-RFH75 (150 W)	560	270	–	–	–	–	–
	MR-RFH220 (400 W)	–	810	–	–	–	–	–
	MR-RFH400 (600 W)	–	–	680	320	150	150	95
Момент инерции J [x10 <sup>-4</sup> кг·м <sup>2</sup> ]		6.6	13.7	20	42.5	82	101	160
Рекомендуемое отношение нагрузка / инерция двигателя		Менее чем в 15 раз относительно момента инерции серводвигателя						
Датчик скорости/положения		Разрешение за один оборот датчика положения/ сервомотора: 13 1072 за один оборот (17 разрядов)						
Структура		Полностью закрытая, не вентилируемая (степень защиты IP65)						
Окружающая среда	Окружающая температура	Рабочая: от 0 до 40°C (без замораживания); Хранение: от -15 до 70°C (без замораживания)						
	Окружающая влажность	Рабочая: 80% максимальной относительной влажности (без конденсации); Хранения: 90% максимальной относительной влажности (без конденсации)						
	Атмосфера	В помещении (без прямых солнечных лучей); без агрессивных газов, без горючих газов, без масляного тумана, без пыли						
	Высота над уровнем моря/Вибрация ④	1000 м или ниже над уровнем моря; X: 24,5 м/сек <sup>2</sup> , Y: 24,5 м/сек <sup>2</sup>			1000 м или ниже над уровнем моря; X: 24,5 м/сек <sup>2</sup> , Y: 49 м/сек <sup>2</sup>		1000 м или ниже над уровнем моря; X: 24,5 м/сек <sup>2</sup> , Y: 29,4 м/сек <sup>2</sup>	
Вес [кг]	Стандартный мотор	5	7	9	12	19	23	32
Информация для заказа	Кат. №2	134811	134864	134865	134866	134867	134868	134869

По табл. 1.2 выберем 3-х фазный вентильный двигатель **HC-SFS152**, имеющий следующие данные:

$$\text{номинальная мощность } P_H = 1,5 \text{ кВт}$$

$$\text{номинальная скорость } n_H = 2000 \text{ об/мин}$$

$$\text{номинальный момент } M_H = 7,16 \text{ Нм}$$

$$\text{максимальный момент } M_{\max} = 21,6 \text{ Нм}$$

$$\text{номинальный ток } I_H = 9 \text{ А}$$

$$\text{максимальный ток } I_{\max} = 27 \text{ А}$$

$$\text{активное сопротивление обмотки статора } R_1 = 4,585 \text{ Ом}$$

$$\text{индуктивность обмотки статора } L_1 = 1,0 \text{ мГн}$$

$$\text{момент инерции } J_D = 20 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Номинальная угловая скорость двигателя

$$w_H = \frac{2p n_H}{60} = \frac{2p \cdot 2000}{60} = 209,4 \text{ с}^{-1} \quad (1.8)$$

Каталожная механическая характеристика двигателя приведена на рис. 1.3.

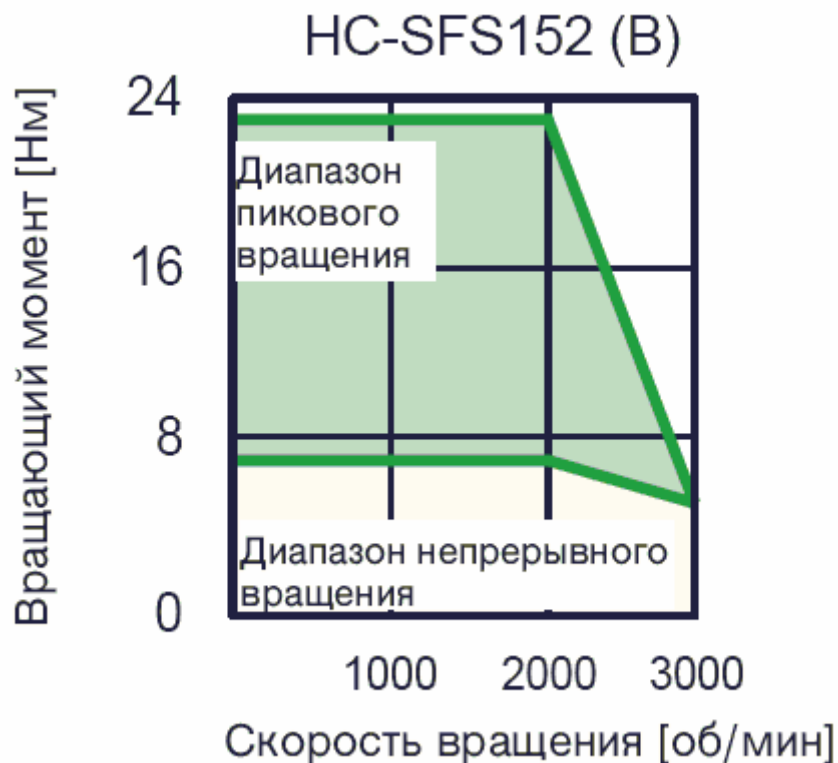


Рис. 1.3. Механическая характеристика двигателя HC-SFS152

#### 1.4. Выбор силового преобразователя

Силовой преобразователь, обеспечивающий питание трехфазной обмотки статора напряжением требуемой амплитуды и частоты, выбирается по току и напряжению. Для оптимальной совместимости и удобства выбора и настройки рекомендуется выбирать двигатель и преобразователь одного производителя. Кроме того, в современные преобразователи часто "зашиваются" математические модели ряда совместимых с ним двигателей. Это актуально особенно для сервоприводов с вентильными двигателями. При присоединении цифрового канала энкодера двигателя с преобразователем (называемый также сервоусилителем), последний опрашивает двигатель и устанавливает оптимальные для него настройки, в том числе параметры регулятора тока. По

этой причине применение двигателей и сервоусилителей разных производителей зачастую невозможно.

В табл. 1.3 приведены возможные комбинации сервоусилителей и серводвигателей MITSUBISHI ELECTRIC. Для выбранного двигателя выберем сервоусилитель модели **MR-J2S-200CL**.

Сервоусилители серии MR-J2S-CL идеальны для законченных и недорогих решений позиционирования. Они имеют встроенный контроллер позиционирования для одной оси, и функции программирования, позволяющие запрограммировать рабочий цикл привода. Программы выбираются и запускаются через цифровые входы или в сетевой системе с поддержкой до 32 осей.

Таблица 1.3

Серия мотоза	Номинальная скорость [об/мин]	Номинальная выходная мощность [кВт]	Модель серводвигателя	Тип серводвигателя		Подходящие усилители MR-J2S														
				С электромагнитным тормозом (В) и датчиком абсолютного положения	Степень защиты	10□	20□	40□	60□	70□	100□	200□	350□	500□	700□					
K	3000	0.05	HC-KFS053	●	IP55	●														
		0.1	HC-KFS13			●														
		0.2	HC-KFS23				●													
		0.4	HC-KFS43					●												
		0.75	HC-KFS73						●											
M	3000	0.05	HC-MFS053	●	IP55	●														
		0.1	HC-MFS13			●														
		0.2	HC-MFS23				●													
		0.4	HC-MFS43					●												
		0.75	HC-MFS73						●											
S	2000	0.5	HC-SFS52	●	IP65				●											
		1.0	HC-SFS102						●											
		1.5	HC-SFS152							●										
		2.0	HC-SFS202								●									
		3.5	HC-SFS352									●								
		5.0	HC-SFS502										●							
R	3000	1.0	HC-RFS103	●	IP65								●							
		1.5	HC-RFS153									●								
		2.0	HC-RFS203										●							
		3.5	HC-RFS353											●						
		5.0	HC-RFS503												●					



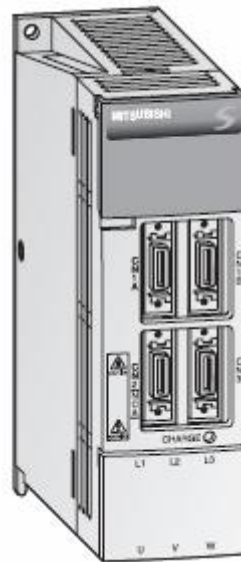


Рис. 1.2. Внешний вид сервоусилителя MR-J2S-200CL

Таблица 1.4

Модель сервоусилителя MR-J2-CL		100CL	200CL	400CL	600CL	700CL	1000CL	2000CL	3500CL	5000CL	7000CL	
Источник питания	Напряжение и частота Допустимые колебания напряжения Допустимые колебания частоты	3-фазн 200 – 230 В AC, 50/60 Гц, 1-фазн 230 В AC, 50/60 Гц		3-фазн 200 – 230 В AC, 50/60 Гц, 1-фазн 230 В AC, 50/60 Гц			3-фазн 200 – 230 В AC, 50/60 Гц					
Система	Двухканальная тормоз	Среднеинверсионная система управления скоростью вращения (V/F) и система управления током										
Защитные функции	Защита от перегрева	Отключается при сильной перегрузке, отключается по последнему реактивному воздействию, отключается по перегрузке (перегрев) электродвигателя, защита сервомотора от перегрева, защита от ошибки датчика положения, защита от ошибки рапорта эдс-индукции тормоза, защита от понижения напряжения (увеличение продолжения питания), защита от чрезмерной скорости, защита от ошибки направления										
	Программируемая система команд	Программирование	Параметры программируются (Программирование осуществляется с помощью кода управления (параметры кода)). Работает в режиме 120 действий									
Ручная работа	Вход задания по потенциометру	Устанавливается вводом программируемых. Диапазон настройки перемещения в 1 полюсе: +1 [мм] до +399,999 [мм]										
	Вход задания скорости	С помощью переключателя, временная комбинация (удерживание) и временная комбинация (удерживание) выбирается по умолчанию программа управления. Временная комбинация ускорения/замедления/б-образная может быть установлена с помощью параметра R4.14 или путем программирования										
Ручная работа	Система команд	Команда сброса отсчета задана с помощью системы команд нарастающих значений с помощью кнопки может быть задана. Система команд нарастающих значений с помощью кнопки										
	Результат работы программы	Установка параметров с помощью программирования										
Ручная работа	Скорость	Работа с помощью выключателя и скорости с параметром, установленным с помощью комбинации скорости, введенной через контактный вход или через RS-485/232C										
	Ручная работа импульсов	Ручная работа производится с помощью ручного генератора импульсов. Мы можем из импульса задать коэффициент умножения: (x1, x0.5 или x100) выбирается с помощью параметра										
Ручная работа	Тип ограничения	Возврат в исходную позицию производится с помощью импульса Z-фазы. После производства без контакта от ограничителя. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть установлено расстояние отсчета исходной позиции. Может быть выбрано направление возврата в исходную позицию. Автоматический возврат в исходную позицию на ограничителе. Функция автоматического возврата										
	Тип отсчета	Возврат в исходную позицию производится по частоте импульсов датчика положения после производства без контакта от ограничителя. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть установлено расстояние отсчета исходной позиции. Функция автоматического возврата										
Ручная работа	Тип установки данных	Возврат в исходную позицию производится без использования ограничителя. Исходная позиция может быть установлена в любой точке с помощью ручной операции и так далее. Может быть установлен адрес исходной позиции										
	Тип отсчета	Возврат в исходную позицию производится путем нажатия детали механизма и протекания тока хода. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть выбрано направление возврата в исходную позицию										
Ручная работа	Назначение исходной позиции	Позиция, где был включен сервис-механизм (SOM), считается исходной позицией. Может быть установлен адрес исходной позиции										
	Средство зад. того кода типа ограничителя	Возврат в исходную позицию производится от исходного заданного конца бесконечного ограничителя. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть установлен диапазон отсчета исходной позиции. Может быть установлен тип отсчета исходной позиции. Может быть установлен тип отсчета исходной позиции. Автоматический возврат в исходную позицию на ограничителе. Функция автоматического возврата										
Ручная работа	Ограничение первого контакта	Возврат в исходную позицию производится от исходного заданного конца бесконечного ограничителя. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть установлено расстояние отсчета исходной позиции. Может быть выбрано направление возврата в исходную позицию на ограничителе. Функция автоматического возврата										
	Тип отсчета ограничителя	Возврат в исходную позицию производится с помощью импульса Z-фазы. После производства без контакта от ограничителя. Может быть установлен адрес исходной позиции. Может быть установлено расстояние отсчета исходной позиции. Может быть выбрано направление возврата в исходную позицию. Автоматический возврат в исходную позицию на ограничителе. Функция автоматического возврата										
Функция управления позицией	Функция управления позицией	Определяет абсолютную позицию, функция сбрасывает ход, защита от перехода через крайнее положение с помощью внешних контактов выключателя, программируемый ограничитель хода, защита от использования внешнего аналогового сигнала										
Безопасность	Безопасность	Самозащита от сбоя (IP00)					Forced-cooling, ован (IP00)					
Сертификация	Сертификация	Соответствует MR-J2S-CL A/B										
Вес (кг)	Вес (кг)	0.7	0.7	1.1	1.1	1.7	1.7	2.0	2.0	4.9	7.2	
Информация для заказа	Кат. №	148271	148272	148269	148268	148267	148272	148273	148274	147153	147154	

## 1.5. Определение характеристик силовых элементов

При расчете привода следует использовать динамические коэффициенты передачи звеньев СЭП, определяемые как отношение приращения выходной переменной к приращению входной переменной в точке статической характеристики звена.

Коэффициент момента (ЭДС) двигателя

$$k_M = k_E = \frac{M_H}{I_H} = \frac{E_D}{w_H} = \frac{7,16}{9} = 0,796 \quad (1.8)$$

Коэффициент передачи сервоусилителя

$$k_{II} = \frac{\Delta E_{II}}{\Delta U_V} = \frac{208}{10} = 20,8 B \quad (1.9)$$

Электромагнитная постоянная времени двигателя

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,001}{4,585} = 0,000218 c \quad (1.10)$$

В связи рекомендуемым соотношением инерционных масс механизма и двигателя  $J_M / J_D$  (не более 15, см. табл. 1.), на ротор двигателя целесообразно установить маховик, обеспечивающий ему дополнительный момент инерции.

Момент инерции двигателя с маховиком

$$J'_D = J_D + J_{доп} = 0,002 + 0,002 = 0,004 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.11)$$

где  $J_{доп} = 0,002 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент инерции маховика.

Суммарный момент инерции электропривода

$$J_{\Sigma} = J'_D + J_M = 0,004 + 0,04 = 0,044 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.12)$$

## 2. КОМПОНОВКА СЭП

### 2.1. Выбор структуры САУ ЭП

Одной из главных функций электропривода подачи токарного станка является точное поддержание заданной скорости подачи. Объектом управления является электромеханическая система, включающая двигатель, электрический преобразователь (сервоусилитель) и механическую часть (редуктор + суппорт). При отсутствии возмущения эта задача может быть решена средствами разомкнутой системы. Однако объект управления обычно нестабилен, нелинеен и подвержен возмущениям, поэтому задающие воздействия отрабатываются с ошибками. Поэтому для получения высоких показателей качества, таких как точность поддержания скорости, малое время переходного процесса и перерегулирования, необходимо применять замкнутую систему автоматического управления (САУ).

Типовая структура САУ ЭП подачи токарного станка имеет замкнутые контуры управления по скорости и току двигателя. Кроме того, в силу особенностей работы вентильного двигателя, для управления инвертором необходима обратная связь по положению ротора двигателя.

### 2.2. Построение функциональной схемы САУ

Функциональная схема САУ приводом подачи представлена на рис. 2.1.

Сигналом управления для сервопривода является задаваемое извне требуемое значение положения. Разница между заданным и истинным значениями положения является входной величиной регулятора положения, который формирует на выходе сигнал задания скорости двигателя  $w_{зАд}$ .

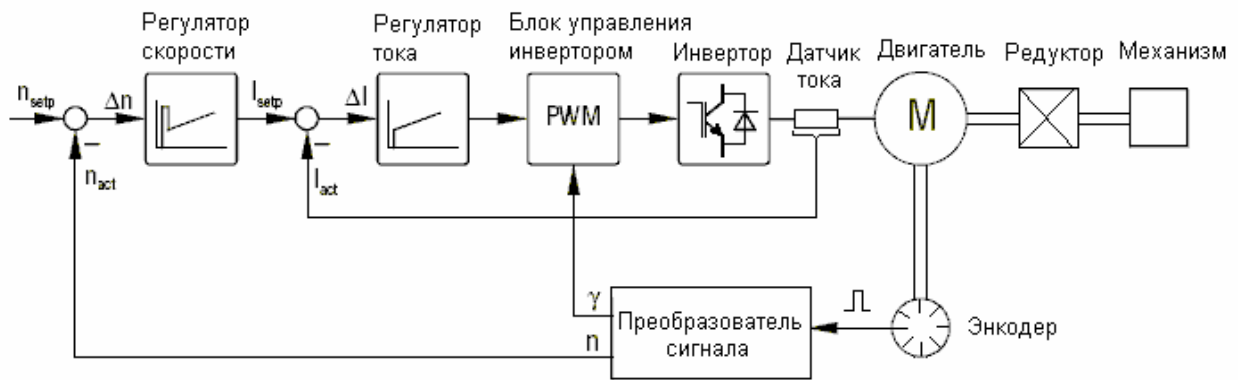


Рис. 2.1. Функциональная схема САУ

Заданное и истинное значения скорости сравниваются на входе регулятора скорости. Их разность обрабатывается в пропорционально-интегральном регуляторе скорости. Выходной сигнал регулятора скорости образует сигнал задания тока и, чтобы защитить двигатель и инвертор, подводится к схеме ограничения, выходной сигнал которой снова представляет собой сигнал задания для регулятора тока. Истинное значение тока с помощью выпрямителя превращается в сигнал постоянного тока. Регулятор тока сравнивает заданное и фактическое значения тока и через широтно-импульсный модулятор образует управляющие сигналы, которые поступают на входы силовых транзисторов инвертора. Исходя из требований быстродействия регулятор тока выполнен аналоговым. Все остальные задачи регулирования, управления и контроля выполняются микроконтроллером.

В данной схеме энкодер служит для построения обратных связей по положению и скорости ротора двигателя.

На рис. 2.2 показана функциональная схема электропривода с раскрытой силовой частью сервоусилителя.

Силовая часть схемы включает в себя преобразователь частоты с инвертором напряжения UZ1, управляемым по принципу широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), и неуправляемым выпрямителем.

При торможении привода кинетическая энергия превращается в электрическую энергию и передается в промежуточный контур. т.к. емкость конденсатора промежуточного контура ограничена, напряжение промежуточного контура повышается. Для того чтобы привод мог тормозиться, нужно гарантировать отвод энергии. Это необходимо, потому что иначе избыточная энергия будет накапливаться или превращаться в другие виды энергии.

Для этого принципиально имеется три возможности:

1. Отдача энергии в сеть (использование электрической энергии другими потребителями).
2. Тормозной прерыватель и тормозное сопротивление (преобразование энергии в тепло).
3. Обмен энергии в многодвигательном приводе (использование электрической энергии подключенных двигателей).

С помощью сетевого модуля можно реализовать любой из названных вариантов.

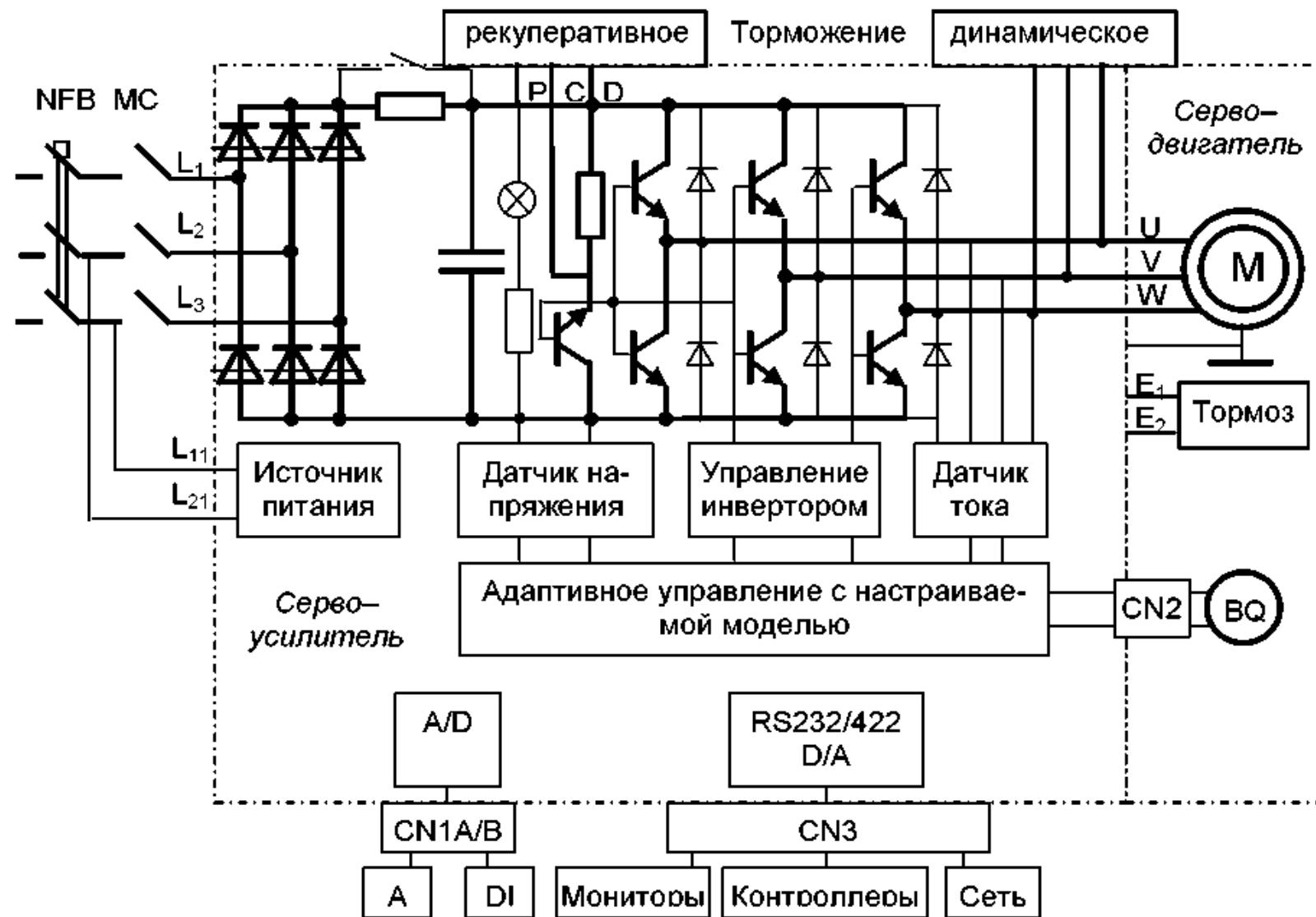


Рис. 2.2. Развернутая функциональная схема сервопривода

### 2.3. Компоновка оборудования СЭП

Основными частями сервопривода MITSUBISHI ELECTRIC (рис. 2.3) являются серводвигатель (servo motor) серии HC со встроенным датчиком положения (encoder) и сервоусилитель (servo amplifier) серии MR-C или MR-J2S. В состав сервопривода могут входить автоматический выключатель NFB (No-fuse breaker), магнитный пускатель MC (Magnetic contactor), линейный фильтр LNF (Line noise filter) или фильтр электромагнитной совместимости EMC (Electromagnetic compatibility filter), радиопомеховый фильтр RNF (Radio noise filter), система рекуперативного торможения RBO (Regenerative brake option). Серводвигатель при необходимости оснащают встроенным электромагнитным тормозом (brake) с организацией аварийного MBR (Emergency brake) и динамического DBR (Dynamic brake) торможения. Вместе с сервоприводом работают компьютер (computer), контроллер позиционирования (positioning unit) и другие промышленные контроллеры. Сервоприводу доступны сигналы путевых датчиков DOG (Proximity dog), генераторов импульсов TP0/TP1 (Pulse generator), коммуникационной аппаратуры. Предусмотрены входы и выходы для обработки программных сигналов: PI1...3 (Program input), OUT1...3 (Program output), SOUT (Synchronized output).

На рис. 2.4. показана принципиальная схема СЭП подачи токарного станка на базе сервопривода MITSUBISHI ELECTRIC с раскрытыми контактными соединениями. В табл. 2.1. сведено назначение всех основных контактов управления.

Для предотвращения электрического удара необходимо соединять контакт защитного заземления (PE) сервоусилителя с защитным заземлением блока заземления (PE) сервоусилителя с защитным заземлением блока управления. Не изменяйте направление включения диода. Его обратное подключение может привести к неправильной работе усилителя, при этом сигналы не будут выводиться, а устройство аварийной остановки и другие его устройства обеспечения безопасности не будет работать. Показанное соединение для

регенеративного тормозного резистора применимо только для сервоусилителя MR-J2S-350CL или менее мощных усилителей этой серии.

Разъемы CN1A, CN1B, CN2 и CN3 имеют одинаковую форму. Неправильное подключение разъемов может привести к отказу или к повреждению входов/выходов сервоусилителя.

Суммарный ток протекающий во внешнем реле, не должен превышать 80мА. Если он превышает 80мА, то надо питать интерфейсные цепи от внешнего источника. При начале эксплуатации надо всегда соединять сигнал конца хода прямого/обратного вращения (LSN/LSP) с SG (нормально замкнутые контакты). Сигнал ошибки (ALM) соединен с ОБЩИМ контактом в нормальном состоянии без тревог. Штырьки с одинаковыми названиями сигналов соединяются в сервоусилителе. При использовании замены (VC) надо сделать доступным устройства выбора замены (OVR).

Сервопривод рассчитан на дистанционное, терминальное и компьютерное управление. Дистанционное управление (distant operation) выполняется по командам, поступающим с оборудования, в рассматриваемой установке — с дистанционного пульта (operation panel), подключаемого разъемами CN1, и с датчика положения (разъем CN2). Терминальное управление производится с лицевой панели (front panel) сервоусилителя. Терминал оборудован миниатюрным дисплеем и четырьмя кнопками. Он отображает состояние сервопривода, диагностические сообщения, неисправности и предупреждения, значения параметров и отсюда же производится настройка. Компьютерное управление рассчитано на выполнение тех же функций, что и терминальное.



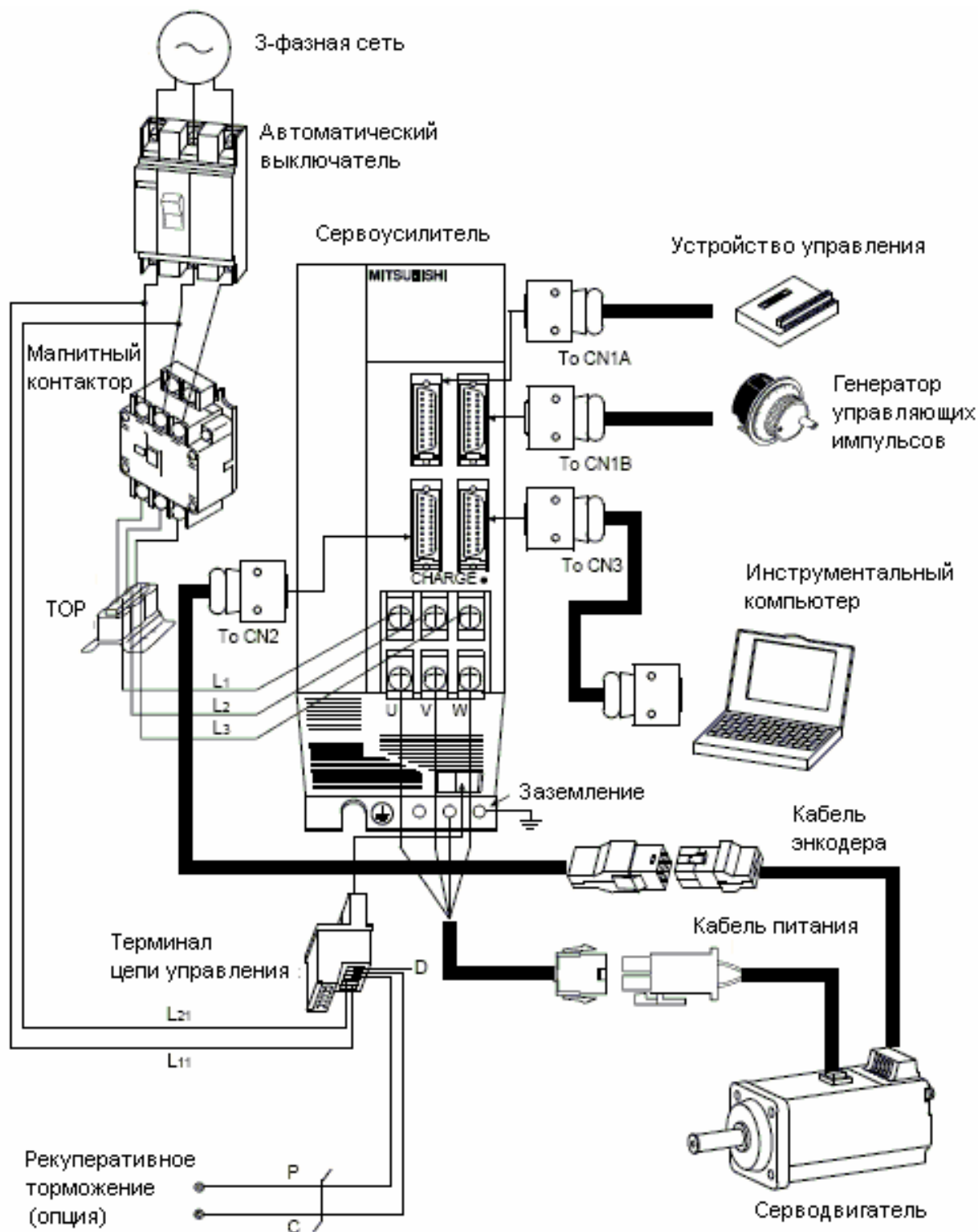


Рис. 2.3. Схема подключения элементов СЭП

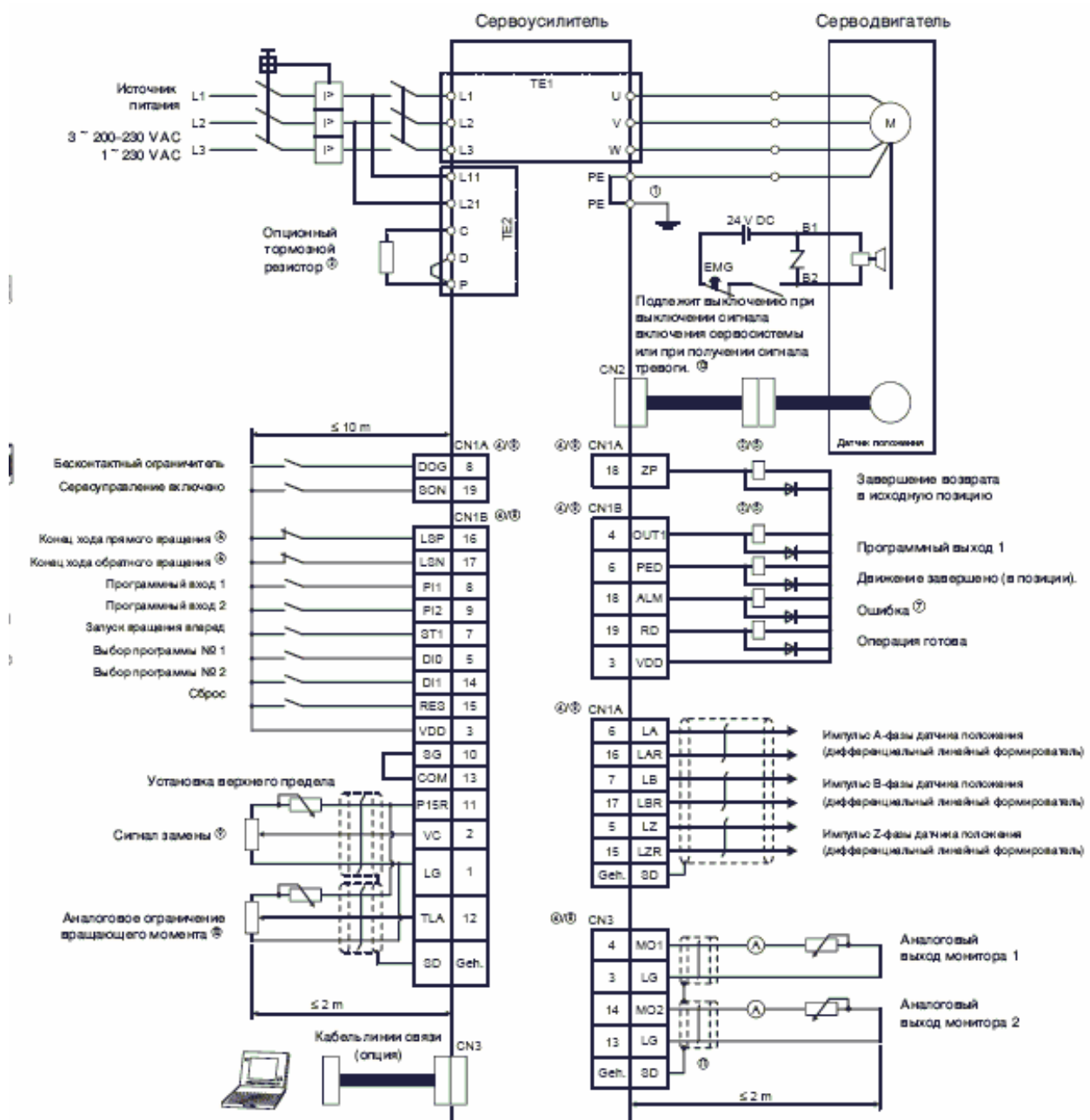


Рис. 2.4. Схема подключения сервоусилителя

Таблица 2.1

<b>Контакт</b>	<b>Название</b>	<b>Пояснение</b>
SON	Servo on	Выключатель «Разрешение»
DI	Digital input	Выключатель «Тихий/быстрый ход» в MR-C или «Выбор программы» в MR-J2S
ST1/ST2	Forward/reverse rotation start	Выключатель «Пуск вперед/назад» при управлении скоростью
PP/NP	Positive/negative position	Выключатель «Пуск вперед/назад» при позиционном управлении
MD0	Automatic/manual selection	Выключатель «Автоматический/ручной режим»
RES	Reset	Выключатель «Сброс»
TL	External torque limit	Выключатель «Внешнее ограничение момента»
TLA	Analog torque limit	Потенциометр «Аналоговое ограничение момента»
OVR	Override selection	Выключатель «Выбор ограничения скорости»
VC	Override	Потенциометр «Ограничение скорости»
ALM	No alarm	Лампа «Исправно»
PF/PED	Positioning finished	Лампа «Позиционирование завершено» в позиционном режиме MR-C, «Подход к заданной скорости» при управлении скоростью MR-C, «Движение завершено» в MR-J2S
RD	Ready	Лампа «Готовность»

## 2.4. Выбор энкодера

Вентильные двигатели в силу особенностей работы должны иметь датчик положения ротора. В качестве датчика положения как правило применяются цифровые датчики положения, называемые также энкодерами (англ. encoder). Кроме того, энкодеры незаменимы при измерении скорости и ускорения. Благодаря рабочему принципу устройства - фотоэлектронное сканирование оптических кодов - в измерениях линейных смещений энкодеры имеют разрешение, измеряемое в миллиметрах, а при измерении угла разрешение составляет всего несколько тысячных градуса. Инкрементные энкодеры

генерируют информацию относительно положения и угла объекта в виде электрических импульсов, соответствующих положению вала. Если вал неподвижен, передача импульсов прекращается. Основным рабочим параметром датчика является количество импульсов на оборот. Текущее положение объекта определяется посредством подсчета данных импульсов в точке измерений. При первом подключении питания необходимо произвести установку вала для определения абсолютного положения. По сравнению с инкрементальными энкодерами, абсолютные энкодеры имеют одно важное преимущество - они сохраняют текущее значение углового перемещения вне зависимости от наличия питания. Абсолютные энкодеры представляют информацию о положении, угле и числе оборотов вала в форме уникальных кодов, которые соответствуют каждому шагу. Основной рабочей характеристикой для абсолютных энкодеров является число уникальных кодов на оборот и количество таких оборотов. Так как абсолютное положение определяется уникальным кодом, первичной установки датчика не требуется. Доступны однооборотные и многооборотные модели энкодеров. Цифровые энкодеры Махон обеспечивают высокое разрешение ( до 0,18 град.), что позволяет получить до 2000 импульсов/оборот, высокую рабочую частоту ( до 100 КГц ), угловое ускорение до 250000 рад/сек. Поддерживаются стандартные выходные сигналы уровня ТТЛ, а также стандартный интерфейс RS422. Оптический энкодер состоит из оптопары (светодиод и фототранзисторы – каналы А, В и Index) и вала с импульсным диском ( диск размечен – частоты разметки зависит разрешающая способность датчика и, как следствие, точность измерения величины.) Вал с диском вращается, свет проходит через щели и образует 3 импульсные последовательности. Первые две сдвинуты друг относительно друга на  $\frac{1}{4}$  периода и служат для определения скорости и направления перемещения. Третья последовательность (Index канал) служит для определения позиции. Точность – до 1000 имп/об.

Абсолютный энкодер относится к типу энкодеров, который выполняет уникальный код для каждой позиции вала. В отличие от инкрементного

энкодера, счетчик импульсов не нужен, т.к. угол поворота всегда известен. Абсолютный энкодер формирует сигнал как во время вращения, как во время вращения, так и в режиме покоя. Диск абсолютного энкодера отличается от диска пошагового энкодера, так как имеет несколько концентрических дорожек. Каждой дорожкой формируется уникальный двоичный код для конкретной позиции вала.

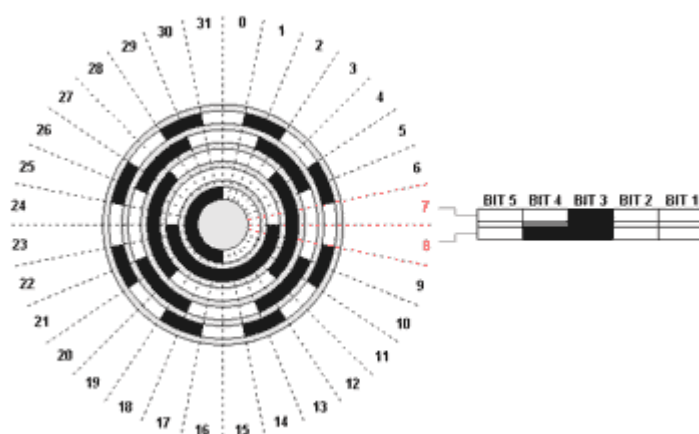


Рис. 2.5. Кодовый диск абсолютного энкодера

Абсолютный энкодер не теряет своего значения при потере питания и не требует возвращения в начальную позицию. Сигнал абсолютного энкодера не подвержен помехам и для него не требуется точная установка вала. Кроме того даже если кодированный сигнал не может быть прочитан энкодером, если, например, вал вращается слишком быстро, правильный угол вращения будет зарегистрирован, когда скорость вращения уменьшится. Абсолютный энкодер устойчив к вибрациям.

### Двоичный код

Двоичный код - это широкораспространенный код, который может обрабатываться непосредственно микропроцессором и является основным кодом для обработки цифровых сигналов. Двоичный код состоит только из 0 и 1. Построение ДК осуществляется по следующему принципу:

$$1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$$

Таким образом выглядит в данном случае число 10 в двоичном коде. Небольшое число, которое может быть выражено двоичным кодом, зависит от количества битов в комбинации, выражающей число. Например, для выражения числовых значений от 0 до 7 достаточно иметь 3-разрядный или 3-битовый код:

<b>числовое значение</b>	<b>двоичный код</b>
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Отсюда видно, что для числа больше 7 при 3-разрядном коде уже нет кодовых комбинаций из 0 и 1. Переходя от чисел к физическим величинам сформулируем вышеприведенное утверждение в более общем виде: наибольшее значений  $m$  какой-либо величины (угла поворота, напряжения, тока и др.), которое может быть выражено двоичным кодом, зависит от числа используемых разрядов  $n$  как  $m=2^n$ . Если  $n=3$ , как в рассмотренном примере, то получим 8 значений, включая ведущий 0. Двоичный код является многошаговым кодом. Это означает, что при переходе с одного положения (значения) в другое могут изменяться несколько бит одновременно. Например, число 3 в двоичном коде = 011. Число же 4 в двоичном коде =100. Соответственно, при переходе от 3 к 4 меняют свое состояние на противоположное все 3 бита одновременно. Считывание такого код с кодового диска привело бы к тому, что из-за неизбежных отклонений (толеранцев) при производстве кодового диска изменение информации от каждой из дорожек в отдельности никогда не произойдет одновременно. Это, в свою очередь, привело бы к тому, что при переходе от одного числа к другому

кратковременно будет выдана неверная информация. Так при вышеупомянутом переходе от числа 3 к числу 4, очень вероятно кратковременная выдача числа 7, когда, например, старший бит во время перехода поменял свое значение немного раньше чем остальные.

Таким образом, использование обычного двоичного кода может привести к большим погрешностям, так как две соседние кодовые комбинации могут отличаться друг от друга не в одном, а в нескольких разрядах. Чтобы избежать этого применяется так называемый одношаговый код, например, так называемой Грей-код.

Код Грея предпочтительнее обычного двоичного тем, что обладает свойством непрерывности бинарной комбинации: изменение кодируемого числа на единицу соответствует изменению кодовой комбинации только в одном разряде. Он строится на базе двоичного по следующему правилу: старший разряд остается без изменения; каждый последующий разряд инвертируется, если предыдущий разряд исходного двоичного кода равен единице. Этот алгоритм построения может быть формально представлен как результат сложения по модулю два исходной комбинации двоичного кода с такой же комбинацией, но сдвинутой на один разряд вправо. При этом крайний правый разряд сдвинутой комбинации отбрасывается.

Таким образом, Грей-код является так называемым одношаговым кодом, т.к. при переходе от одного числа к другому всегда меняется лишь один бит. Погрешность при считывании информации с механического кодового диска при переходе от одного числа к другому приведет лишь к тому что от одного положения к другому будет лишь несколько смещен по времени однако выдача совершенно неверного значения углового положения при переходе от одного положения к другому полностью исключается. Преимуществом Грей-кода является также его способность зеркального отображения информации. Так, инвертируя старший бит можно простым образом менять направление счета и, таким образом, подбирать к фактическому (физическому) направлению вращения оси. Изменение направления счета может легко изменяться, управляя

так называемым входом "Complement". Выдаваемое значение может быть возрастающим или спадающим при одном и том же физическом направлении вращения оси.

Поскольку информация, выраженная в Грей-коде, имеет чисто кодированный характер не несущей реальной числовой информации, должен он перед дальнейшей обработкой сперва преобразован в стандартный бинарный код. Осуществляется это при помощи преобразователя кода (декодера Грей-Бинар), который к счастью легко реализуется с помощью цепи из логических элементов «исключающее или» (XOR) как программным, так и аппаратным способом (см. схему ниже)

Из таблицы видно, что при переходе от одного числа к другому (соседнему) лишь один бит информации меняет свое состояние, если число представлено кодом Грея, в то время, как в двоичном коде могут поменять свое состояние несколько бит одно временно. Код Грея - выход, следовательно, он никогда не имеет ошибку чтения и применяется во многих абсолютных энкодерах.

Таблица 2.2.

Десятичный код	Двоичный код				Код Грея
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$	
0	0	0	0	0	0 0 0 0
1	0	0	0	1	0 0 0 1
2	0	0	1	0	0 0 1 0
3	0	0	1	1	0 0 1 1
4	0	1	0	0	0 1 0 0
5	0	1	0	1	0 1 0 1
6	0	1	1	0	0 1 1 0
7	0	1	1	1	0 1 1 1
8	1	0	0	0	1 0 0 0
9	1	0	0	1	1 0 0 1
10	1	0	1	0	1 0 1 0
11	1	0	1	1	1 0 1 1
12	1	1	0	0	1 1 0 0
13	1	1	0	1	1 1 0 1
14	1	1	1	0	1 1 1 0
15	1	1	1	1	1 1 1 1



Обычный одношаговый Грей-код подходит для разрешений, которые могут быть представлены в виде числа возведенного в степень 2. В случаях, где надо реализовать другие разрешения из обычного Грей-кода, вырезается и используется средний его участок. Таким образом, сохраняется «одношаговость» кода. Однако числовой диапазон начинается не с нуля, а смещается на определенное значение. При обработке информации от генерируемого сигнала отнимается половина разницы между первоначальным и редуцированным разрешением. Такие разрешения как, например,  $360^\circ$  для выражения угла часто реализуются этим методом. Так 9-ти битный Грей-код равный 512 шагов, урезанный с обеих сторон на 76 шагов будет равен  $360^\circ$ .

Серводвигатели MITSUBISHI ELECTRIC поставляются со встроенным энкодером, имеющими максимальное разрешение 131072 импульса на оборот. Энкодер имеет кабель обратной связи для подключения к разъему CN2, на лицевой панели сервоусилителя.

### 3. СИНТЕЗ И РАСЧЕТ ДИНАМИКИ СЭП С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

#### 3.1. Составление передаточных функций звеньев СЭП

Системы, которые удается линеаризовать и аппроксимировать аналоговыми звеньями, описываются операторными выражениями с использованием передаточных функций и структурных схем. Линеаризация и аппроксимация бывает технической или аналитической. В частности, все основные типы двигателей можно считать в той или иной степени технически линеаризованными механизмами, приспособленными к работе в составе точного электропривода. Синхронный серводвигатель, полученный в результате технической линеаризации, отличается от простой синхронной машины наличием встроенного датчика положения ротора и работой через инвертор тока. Датчик положения ротора устанавливается таким образом, чтобы формируемый пространственный вектор ЭДС был ориентирован по оси, ортогональной потокоцеплению ротора. А инвертор, работающий в режиме источника тока, поддерживает между векторами тока и потокоцепления ротора угол  $q_y = \frac{p}{2}$  аналогично двигателю постоянного тока [8].

Электрические преобразователи обычно тоже представляют линеаризованными моделями. Благодаря линеаризации, явления, связанные со спецификой преобразователя как нелинейного динамического элемента системы, мало сказываются на качестве регулирования. Поэтому в большинстве случаев расчета систем электропривода электрический преобразователь представляется моделью инерционного звена.

В системах с подчиненными контурами регулирования структурно выделяются несколько контуров, каждый из которых содержит свой объект регулирования. Настройка внутреннего контура производится как правило на ОМ. Внешний по отношению к нему контур включает в себя собственный

объект, звенья с малыми постоянными времени и замкнутый внутренний контур. При расчете параметров регулятора внешнего контура внутренний контур учитывается как звено с некоторой эквивалентной малой постоянной времени. Такой принцип построения системы упрощает ее настройку, обеспечивает максимально большое быстродействие и простое ограничение выходных величин внутренних контуров путем ограничения выходных сигналов регуляторов внешних контуров.

Построенная выше функциональная схема СЭП дает возможность выделить отдельные динамические звенья САУ 1-го и 2-го порядка. Для каждого динамического звена необходимо составить его передаточную функцию (ПФ) и структурную схему.

Силовой преобразователь (инвертор) вместе с системой управления и фильтром для сглаживания пульсаций входных сигналов в первом приближении может быть представлен апериодическим звеном в первом приближении может быть представлен апериодическим звеном с ПФ

$$W_{\Pi}(p) = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1} = \frac{20,8}{0,001p + 1}, \quad (3.1)$$

где  $T_{\Pi} = 0,001c$  - постоянная времени преобразователя.

Передаточная функция аналогового датчика тока, интегрированного в силовой преобразователь

$$W_{от}(p) = \frac{k_{от}}{T_{дт}p + 1} = \frac{0,37}{0,001p + 1}, \quad (3.2)$$

где  $k_{от} = \frac{U_{pc.o}}{I_{max}} = \frac{10}{27} = 0,37 \frac{B}{A}$  - коэффициент передачи датчика тока

$T_{дт} = 0,001c$  - постоянная времени датчика тока.

ДТ, ДС – датчики тока и скорости с коэффициентами передачи (обратной связи) и постоянными времени  $T_{дт} = 0,001c$ ,  $T_{дс} = 0,001c$ ;

Передаточная функция цифрового датчика скорости, функции которого выполняет энкодер

$$W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{дс}p + 1} = \frac{0,0478}{0,001p + 1}, \quad (3.3)$$

где  $k_{oc} = \frac{U_{3H}}{w_H} = \frac{10}{209,4} = 0,0478 \text{ В} \cdot \text{с}$  - коэффициент передачи датчика скорости;  
 $T_{дс} = 0,001 \text{ с}$  - постоянная времени датчика скорости.

Электропривод с упругими механизмами, рассматривается как многомассовая система. В большинстве случаев механизм с упругостью удается представить двухмассовой моделью (рис. 3.1), в которой движущиеся узлы заменяются двумя массами [3]. Первая масса сосредоточена на валу двигателя, обладает моментом инерции  $J_D$  и вращается со скоростью  $\omega_1$ . Вторая масса отделена от двигателя упругим звеном с коэффициентом жесткости  $c_y$ , обладает моментом инерции  $J_M$  и вращается со скоростью  $\omega_2$

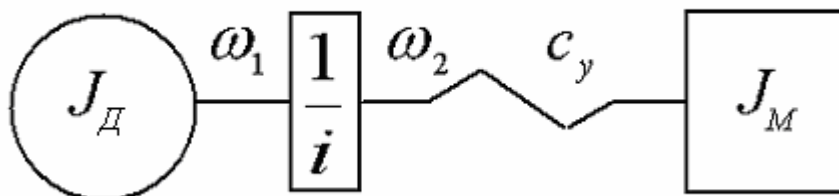


Рис. 3.1. Двухмассовая модель с упругой связью

Передаточная функция привода с учетом упругости механической части

$$W_1(p) = \frac{1}{J_{\Sigma}p} \cdot \frac{T_2^2 p^2 + 2x_2 T_2 p + 1}{T_1^2 p^2 + 2x_1 T_1 p + 1} = \frac{1}{0,044p} \cdot \frac{0,00111p^2 + 0,002p + 1}{0,0001p^2 + 0,002p + 1}, \quad (3.4)$$

где:  $T_1 = \frac{1}{w_y} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ с}$  - постоянная времени, определяющая упругий резонанс на частоте  $w_y$ ;

$$q = \frac{J_D}{J_D + J_M} = \frac{0,004}{0,004 + 0,04} = 0,091 \text{ - коэффициент соотношения инерционных}$$

масс;  $\sqrt{q} = 0,3$ ;

$$T_2 = \frac{T_1}{\sqrt{q}} = \frac{0,01}{0,3} = 0,0333 \text{ с - постоянная времени, характеризующая «провал» в}$$

ЛАХ объекта на частоте  $w_y \sqrt{q}$ ;

$x_1 = x_y = 0,1$ ;  $x_2 = x_1 \cdot \sqrt{q} = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03$  - коэффициенты демпфирования упругих звеньев.

Передаточная функция механической части привода приведенной к валу двигателя

$$W_2(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + 2x_2 T_2 p + 1} = \frac{1}{0,00111p^2 + 0,002p + 1}. \quad (3.5)$$

### 3.2. Построение структурной динамической модели и синтез регуляторов

На основании разработанной функциональной схемы и передаточных функций звеньев СЭП необходимо построить динамическую структурную схему (ДСС) системы, обозначив на ней соответствующие функциональные звенья и регулируемые параметры.

Динамическая структурная схема (ДСС) СЭП с вентильным двигателем и контурами тока и скорости представлена на (рис. 3.2) [2, 11], где РС, РТ – регуляторы скорости и тока двигателя с передаточными функциями  $W_{PC}(p)$  и  $W_{PT}(p)$ .

Данная ДСС получена при условии  $i_{1d3} = 0$  [2, 11]. Для этого должна применяться специальная коррекция для форсирования  $u_{1d} = f(w)$  при высоком быстродействии АИН ( $T_{II} \approx 0$ ).

При  $i_{1d} = 0$  уравнения электромеханической и механической характеристик будут

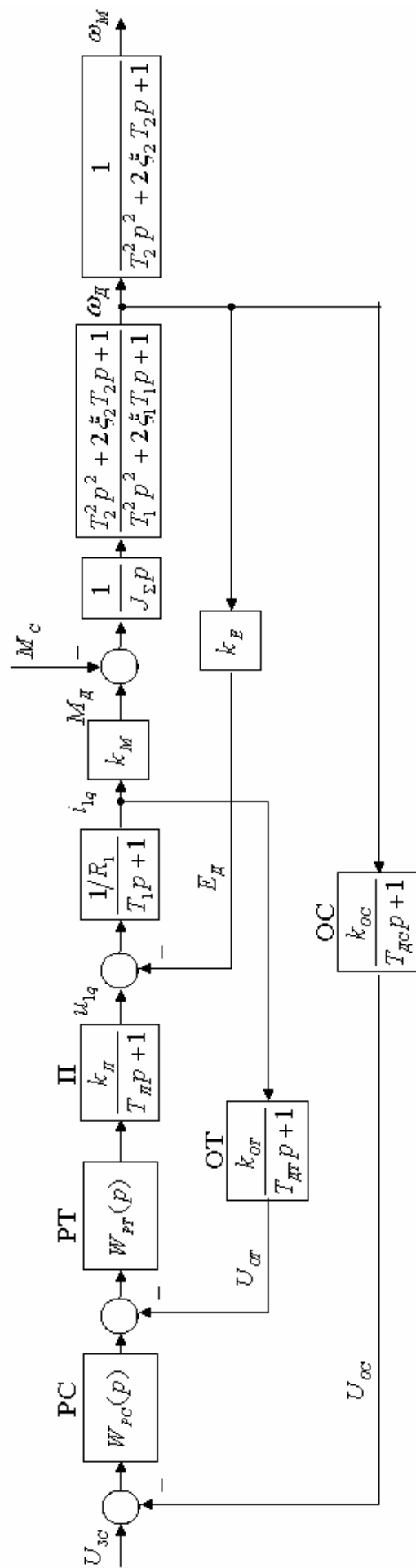


Рис. 3.2. Динамическая структурная схема СЭП с вентильным двигателем

$$w = \frac{u_{1q} - R_1 i_{1q}}{k_E}; \quad w = \frac{u_{1q}}{k_E} - \frac{M_C R_1}{k_E^2}, \quad (3.6)$$

т.е. указанные характеристики совпадают с таковыми для ДПТ с независимым возбуждением и являются линейными. Линейность характеристик нарушается, если  $i_{1d} \neq 0$ .

В системах подчиненного регулирования оптимизация контуров обычно выполняется в соответствии со стандартными настройками с учетом условий работы СЭП и соотношения параметров объекта управления.

Контур тока в системах подчиненного регулирования чаще всего настраивается на оптимум по модулю (ОМ) [6].

При этом ПИ-регулятор тока с передаточной функцией

$$W_{PT}(p) = b_2 \frac{t_2 p + 1}{t_2 p}. \quad (3.7)$$

имеет параметры

$$\left. \begin{aligned} b_2 &= \frac{T_1 R_1}{2k_{II} k_{OT} T_{\Sigma 2}} = \frac{0,000218 \cdot 4,585}{2 \cdot 20,8 \cdot 0,37 \cdot 0,002} = 0,0325; \\ t_2 &= T_1 = 0,000218c \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где  $T_{\Sigma 2} = T_{II} + T_{DT} = 0,001 + 0,001 = 0,002c$ .

Передаточные функции разомкнутого и замкнутого токового контура соответственно будут

$$\left. \begin{aligned} W_{P2}(p) &= \frac{1}{2T_{\Sigma 2} p (T_{II} p + 1)(T_{DT} p + 1)} \approx \frac{1}{2T_{\Sigma 2} p (T_{\Sigma 2} p + 1)} \\ W_{32}(p) &\approx \frac{1}{k_{OT} (2T_{\Sigma 2}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 2} p + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Частота среза контура тока

$$w_{C2} = \frac{1}{2T_{\Sigma 2}} = \frac{1}{2 \cdot 0,002} = 250c^{-1}. \quad (3.10)$$

В СЭП с упругой связью контур скорости настраивается в зависимости от соотношения механических параметров. При  $q < 0,5$  параметры ПИ-регулятора скорости с передаточной функцией

$$W_{PT}(p) = b_2 \frac{t_2 p + 1}{t_2 p} \quad (3.11)$$

выбирают по формулам:

$$b_1 = \frac{J_{\Sigma} k_{OT} w_y \sqrt{q}}{2k_{OC} k_M} = \frac{0,044 \cdot 0,37 \cdot 100 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,0478 \cdot 0,796} = 6,42;$$

$$t_1 = \frac{4}{w_y \sqrt{q}} = \frac{4}{100 \cdot 0,3} = 0,133 \text{ с}.$$

Для подавления упругих колебаний в механической системе в САУ вводятся дополнительные средства последовательной коррекции в виде активного режекторного фильтра (АРФ) с передаточной функцией

$$W_{AF}(p) = \frac{k_{AF}(T_1^2 p^2 + 2x_1 T_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2x_2 T_1 p + 1} = \frac{1 \cdot (0,0001 p^2 + 0,002 p + 1)}{0,0001 p^2 + 0,02 p + 1},$$

где  $k_{AF} = 1$  - коэффициент передачи АРФ;  $x_2 = 0,5 \dots 1$  - коэффициент демпфирования.

Динамическая структурная схема СЭП с АРФ представлена на рис. 3.3.

### 3.3. Исследование динамики СЭП

Исследование динамики сервопривода проведем с помощью интерактивного инструмента для моделирования, имитации и анализа динамических систем – пакет прикладных программ MATLAB с расширением Simulink.

MATLAB выполняет множество задач для поддержки научных и инженерных работ, начиная от сбора и анализа данных до разработки приложений. Среда MATLAB объединяет математические вычисления, визуализацию и мощный технический язык.



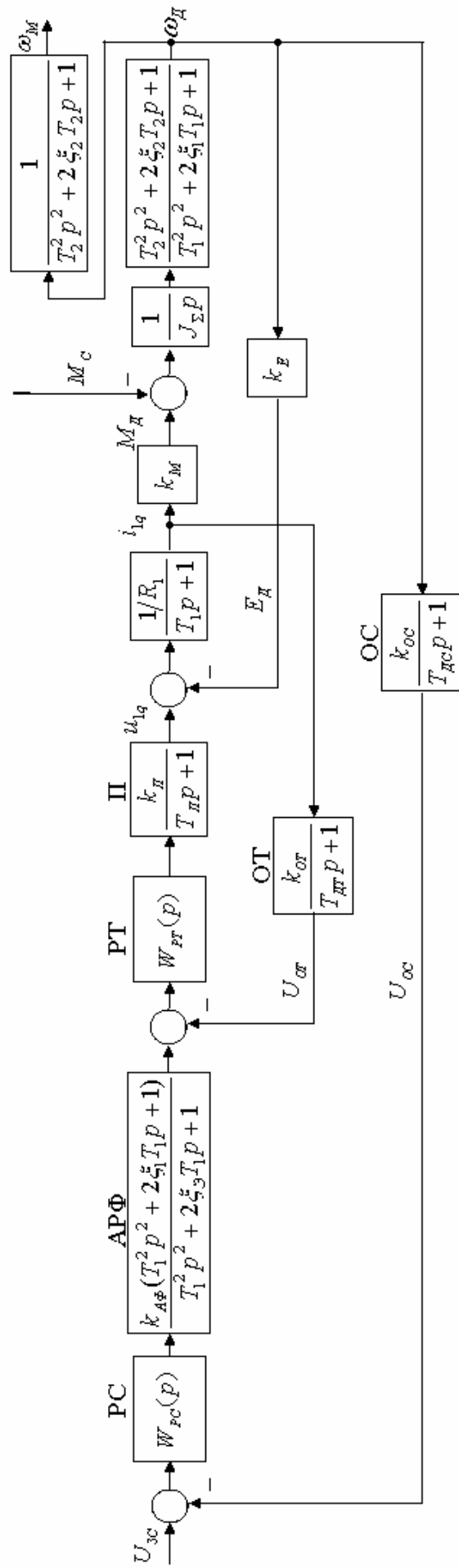


Рис. 3.3. Динамическая структурная схема оптимизированной СЭП

Встроенные интерфейсы позволяют получить быстрый доступ и извлекать данные из внешних устройств, файлов, внешних баз данных и программ. MATLAB имеет широкий спектр применений, включая цифровую обработку сигналов и изображений, проектирование систем управления, естественные науки, финансы и экономику, а также приборостроение. Открытая архитектура позволяет легко использовать MATLAB и сопутствующие продукты для исследования данных и быстрого создания конкурентоспособных пользовательских инструментов. В состав данного релиза включены новейшие версии программных продуктов:

Simulink является интерактивным инструментом для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Он дает возможность строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты. Simulink полностью интегрирован с MATLAB, обеспечивая немедленным доступом к широкому спектру инструментов анализа и проектирования.

Simulink также интегрируется с Stateflow для моделирования поведения, вызванного событиями. Эти преимущества делают Simulink наиболее популярным инструментом для проектирования систем управления и коммуникации, цифровой обработки и других приложений моделирования.

Динамическая структурная схема СЭП в Simulink с учетом упругой связи и с введенной последовательной коррекцией представлена на рис. 3.4.

На рис. 3.5 построены логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) разомкнутого контура скорости. Частота среза составила  $\omega_{c1} = 16,3 \text{ c}^{-1}$ , запас по фазе составил  $\Delta j_{p1} = 180 - 134 = 46^\circ$ , что должно обеспечить быстропротекающие и устойчивые переходные процессы.

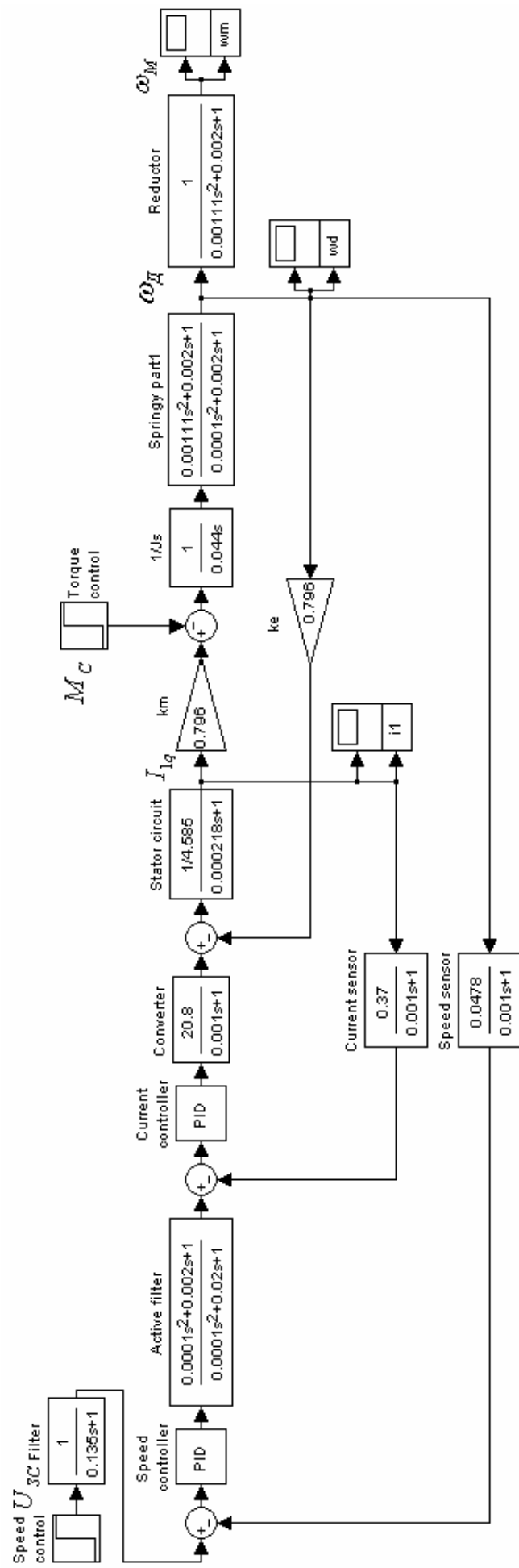


Рис. 3.4. Математическая модель СЭП подачи в Simulink

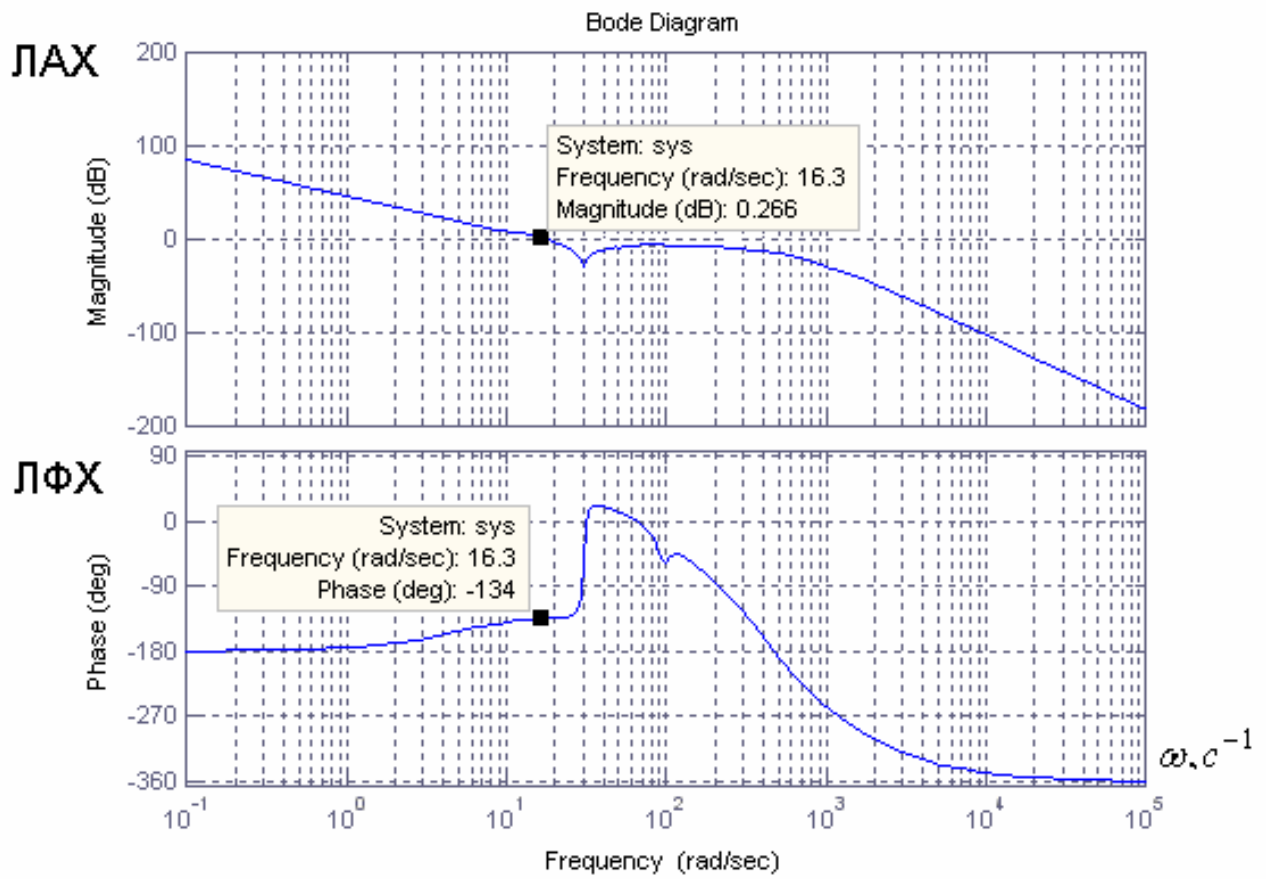


Рис. 3.5. Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура скорости

При снятии переходных процессов по управляющему воздействию для снижения перерегулирования на вход контура скорости системы был установлен фильтр в виде апериодического звена с постоянной времени, равной  $T_{\phi} = 0,135 \text{ с}$ .

При подаче на вход системы единичного ступенчатого управляющего воздействия перерегулирование по скорости двигателя составило

$$s = \frac{w_{\max} - w_{\text{уст}}}{w_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{21,8 - 20,9}{20,9} \cdot 100\% = 4,3\% ,$$

что соответствует техническому заданию в 5 %; время переходного процесса составило  $t_{\text{III}} = 0,22 \text{ с}$ , что соответствует техническому заданию (не более 0,35 с). Графики переходных процессов по скорости механизма, скорости и току статора двигателя по управляющему воздействию показаны соответственно на рис. 3.6, 3.7 и 3.8.

При подаче на вход возмущающего воздействия  $M_c = 3,45 \text{ Нм}$ , время переходного процесса по скорости механизма составило  $t_{\text{IV}} = 0,4 \text{ с}$ , что не превышает заданное (не более 0,4 с). Графики переходных процессов по скорости механизма, скорости и току статора двигателя по возмущающему воздействию показаны соответственно на рис. 3.5, 3.6 и 3.7.

Динамическая ошибка на верхней и нижней скорости составила

$$n_{\text{ДВ}} = \frac{3,4}{209,4} \cdot 100\% = 1,62\% ; \quad n_{\text{ДН}} = n_{\text{ДВ}} \cdot D = 1,62 \cdot 500 = 810\% .$$

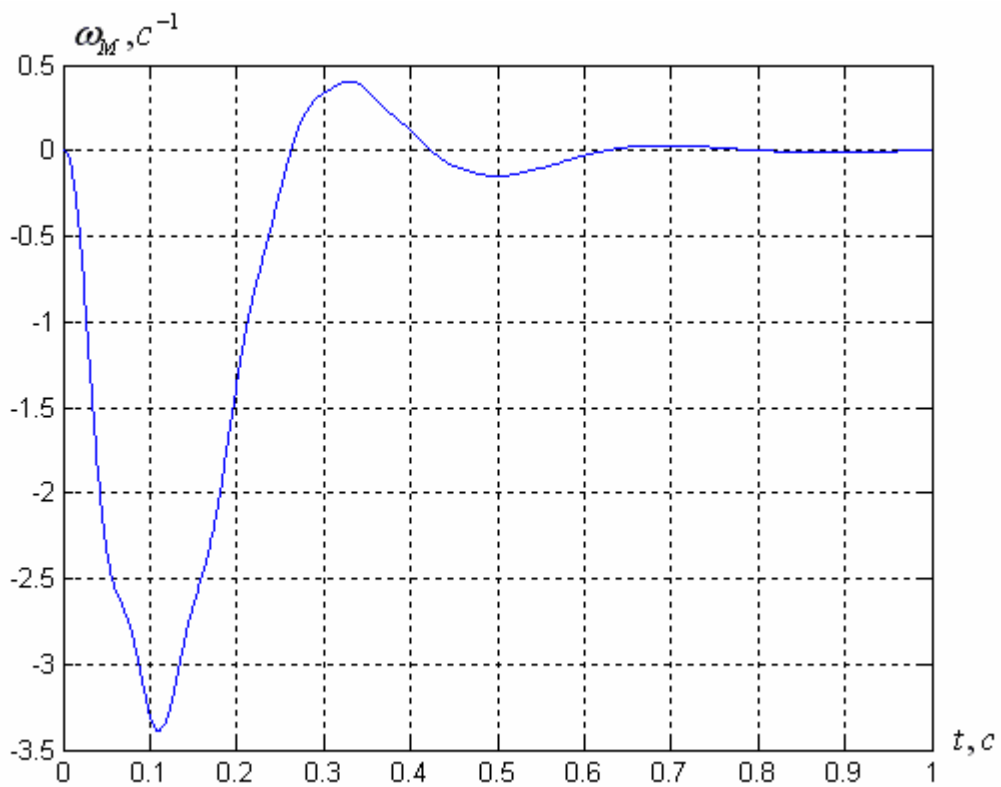
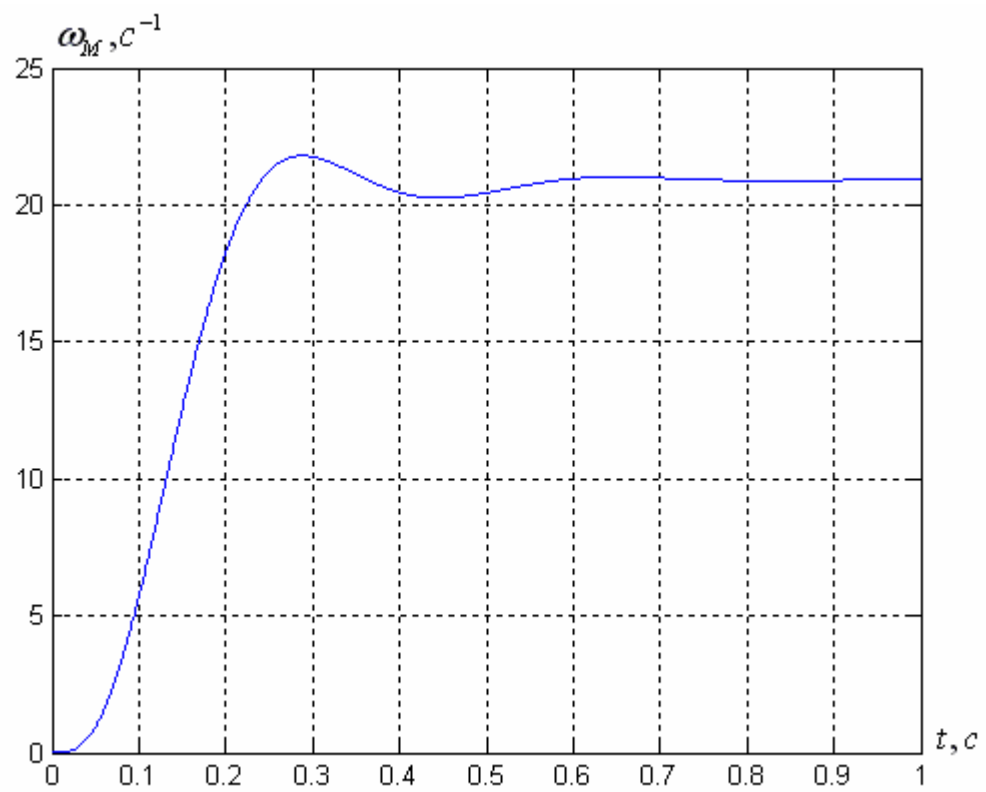


Рис. 3.6. Графики переходных процессов по скорости механизма при управляющем и возмущающем воздействиях

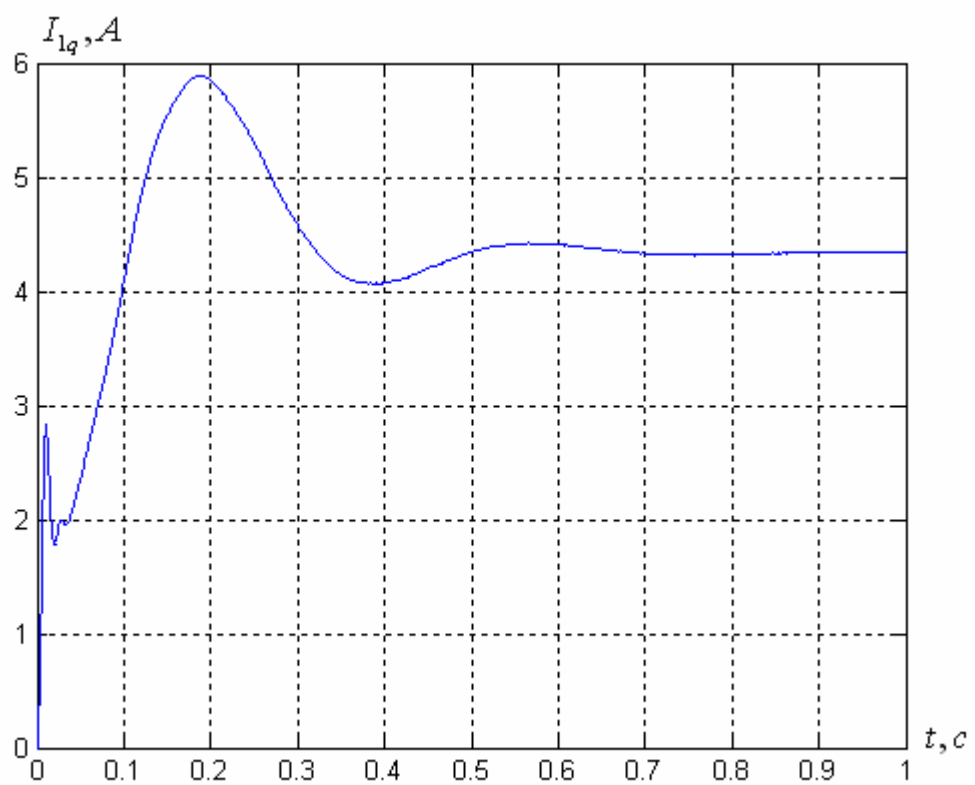
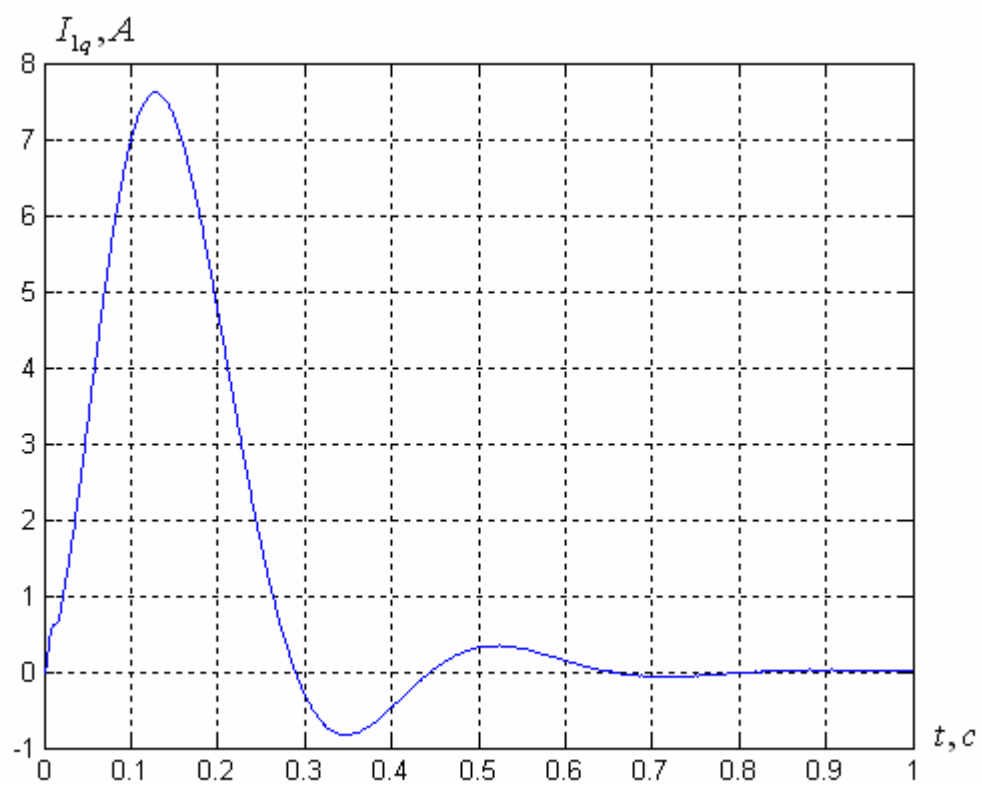


Рис. 3.7. Графики переходных процессов по току двигателя при управляющем и возмущающем воздействиях

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выпускной квалификационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Сервоприводы целесообразно использовать там, где недостаточно точности и диапазона регулирования обычных общепромышленных приводов переменного тока на базе асинхронных двигателей. Сервоприводами оснащаются прецизионные системы поддержания скорости и позиционирования промышленных роботов, высокоточных станков и других агрегатов.
2. Выполнен расчет и выбор элементов силовой и регулирующей частей привода подачи на базе компонентов фирмы MITSUBISHI ELECTRIC. В зависимости от требований заказчика возможно применение решений других производителей, в том числе и отечественных.
3. Произведено построение математической модели сервопривода и исследование динамики синтезированного электропривода на ЭВМ в системе имитационного моделирования MATLAB - Simulink, которое показало соответствие полученных динамических показателей техническому заданию.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. 1982.
2. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов – М: Издательский центр «Академия», 2004.
3. Водовозов В. М. Теория и системы электропривода: Учебное пособие. – СПб, Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004.
4. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002.
5. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
7. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
8. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981.
9. Технический каталог серводвигателей и сервоусилителей MITSUBISHI ELECTRIC, 2004.
10. Автоматизированный электропривод: Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов специальности 2102. СПб., 2004.