

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.т.н., профессор

_____/М.М. Дудкин/

“ _____ ” _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

_____/А.Н. Шишков/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Автоматизированный электропривод одностоечного подъемника
с повышенной точностью позиционирования груза

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)

ЮУрГУ-13.04.02.2017.051 ВКР

Руководитель проекта:

Доцент, к.н.т.

_____/Т.А. Функ /

“ _____ ” _____ 2017 г.

Автор проекта

студент группы _____ П-286 _____

_____/Т.А. Казанцева/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Нормоконтролер:

Доцент, к.т.н.

_____/Т.А. Функ/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Челябинск 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Казанцева Т.А. Автоматизированный электропривод одностоечного подъемника с повышенной точностью позиционирования груза. - Челябинск: ЮУрГУ, П; 2017, 150 с., 49 ил., библиогр. список – 133 наим., 1 прилож.

В выпускной квалификационной научной работе (диссертации) разработана система автоматизации стационарного грузового мобильного одностоечного подъемника с электрическим приводом с повышенной точностью позиционирования груза (далее – одностоечный подъемник). Эта точность обеспечивается за счет введения системы стабилизации платформы и косвенных методов оценки параметров. За основу взят автоматизированный электропривод одностоечного подъемника, расчет и автоматизация которого были произведены в бакалавриате. Цель данной разработки – расширение областей применения этих подъемников, в том числе для использования в автоматизированных складах, автоматизированных автомобильных сборочных конвейерных лентах.

Проведен анализ научно-технической литературы в области грузоподъемных механизмов. Проведена принятая в технической среде классификация этих механизмов, проанализированы их особенности и сферы применения. На основании приведенной классификации в качестве объекта автоматизации выбран одностоечный подъемник.

					ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дат</i>				
Разраб.	Казанцева Т.А.				Автоматизированный электропривод одностоечного подъемника с повышенной точностью позиционирования груза. Пояснительная записка	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Провер.	Функ Т.А.						4	150
Реценз						ЮУрГУ		
Н. Контр.	Функ Т.А.					Кафедра «АЭП»		
Утверд.	Шишков А.Н.							

ВВЕДЕНИЕ

1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1. Описание технологических условий работы

1.2. Кинематическая схема

1.3. Техничко-экономическое обоснование системы ЭП

1.4. Технические данные проектирования

2 ОПИСАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

3 РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Качественный выбор системы ЭП

3.2. Выбор регулируемого преобразователя

3.3. Статические и динамические характеристики ЭП

4 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

4.1. Описание технологического процесса работы одностоечного подъемника

4.2. Выбор элементной базы

4.3. Программное обеспечение системы автоматизации

5 МОДЕРНИЗАЦИЯ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

5.1. Классификация методов косвенной оценки составляющих углового перемещения

5.2. Анализ состояния и перспективы развития работ по бездатчиковому определению скорости электропривода

5.3. Адаптивные наблюдатели

5.3.1. История возникновения адаптивного управления

5.3.2. Адаптивные системы с эталонной моделью

5.3.3. Адаптивные наблюдатели полного порядка

5.3.4. Адаптивные наблюдатели пониженного порядка (наблюдатель Люенбергера)

									Лист
									6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

5.4.Расширенный фильтр Кальмана

5.4.1. История возникновения фильтра Кальмана

5.4.2. Описание фильтра Кальмана

5.5.Наблюдатели, использующие скользящие режимы

5.6.Нейронные наблюдатели

5.6.1. История возникновения нейронных наблюдателей

5.6.2. Описание нейронных наблюдателей

5.7.Сравнение методов косвенной оценки составляющих углового перемещения ротора и выбор метода регулирования автоматической системы

5.8.Практическое использование MRAS в системе управления электродвигателем однофазного подъемника

5.9.Практическое использование MRAS в системе стабилизации однофазного подъемника

5.10. Анализ научно-технической литературы на предмет подобной модернизации однофазного подъемника

5.11. Разработка системы стабилизации однофазного подъемника

5.12. Обзор преобразователей частоты отечественного производства, разработанных специально для грузоподъемных механизмов

6 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ MRAS В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

						Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ

ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные механизмы и машины предназначены для перемещения грузов и людей по заранее заданной траектории. Такие машины классифицируют по конструктивным признакам, по характеру выполняемой или работы, а также по назначению.

Для подъема груза на небольшую высоту служат простейшие ГПМ – *домкраты*, обычно используемые при монтажных и ремонтных работах. Привод домкратов может быть механическим и ручным, а грузоподъемность составляет от 2 до 20 т.

Широко распространены гидравлические домкраты. Их особенности: малые габариты и масса, высокий КПД (0,75 .. 0,8), грузоподъемность до 200 т, плавный подъем и спуск груза при весьма точной его фиксации на заданной высоте. Недостаток гидравлических домкратов – ограниченная высота подъема груза на малых скоростях.

Также выпускаются гидравлические домкраты с механизированным приводом. Их используют для подъема тех грузов, грузоподъемности и высоты подъема которых недостаточно для домкрата с ручным приводом.

К простейшим грузоподъемным механизмам относятся также и *лебедки*. Они предназначены не только для проведения ремонтных и строительно-монтажных работ, но и для подъема или опускания грузов. Лебедки применяются не только как самостоятельные механизмы, но и в качестве силового оборудования для формирования более сложных подъемных устройств (кранов, подъемников и т.д.).

При небольших массе и скорости подъема груза применяют *лебедки с ручным приводом*. У такого вида ГПМ вращение барабана происходит с помощью рукояток, которые являются приводом в таком подъемном механизме. Лебедки с ручным приводом оснащены тормозом, который автоматически останавливает вращение барабана в случае прекращения вращения рукоятки.

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

При производстве маневровых работ в портах и доках, для подъема якорей на суда, на железнодорожных путях, при подтаскивании различных грузов и т.п. часто используются *шпили* – лебедки с фрикционным барабаном, имеющим горизонтальную или вертикальную ось вращения.

Для транспортирования грузов внутри цехов и между ними, обслуживания автоматических и поточных линий, станков применяются *тали* – компактные подъемные лебедки. Особенности: устанавливаются стационарно или на передвигающихся тележках, с электрическим, ручным или пневматическим приводами [1], грузоподъемность (0,25 .. 15) т. Скорость горизонтального передвижения талей устанавливают в зависимости от длины пути и назначения тали, а скорость подъема составляет (5 .. 25) м/мин.

Когда возникает необходимость перемещения груза по предварительно определенной траектории, применяют *подъемники*. Подъем груза в подъемниках происходит в кабинах (клетях), в бадьях или на платформах, которые перемещаются по жестким направляющим. Траектория движения (вертикальное или близкое к вертикальному направлению) перемещаемого груза в подъемниках устанавливается очертанием направляющих и в процессе работы не изменяется.

Перемещающие груз подъемники только строго по вертикали, называют *лифтами*. Их применение в различных отраслях промышленности расширяется. Лифты нашли широкое применение почти во всех сферах жизнедеятельности человека: погрузочно-разгрузочные работы в складских помещениях, подъем и опускание людей и грузов в шахтах и рудниках; промышленные работы, эксплуатация жилых и нежилых многоэтажных и высотных зданий и сооружений, метеорологические вышки.

Подъемники, основное назначение которых – перемещение сыпучих грузов в саморазгружающихся ковшах (скипах) по жестким направляющим – называют *скиповыми* или *ковшовыми*.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

Эти подъемники применяют в производстве и складском хранении для наполнения вагранок, доменных печей и т.д.

Грузоподъемные краны – наиболее распространенные грузоподъемные машины циклического действия. Предназначены они для захвата (обеспечивается грузозахватным устройством) и перемещения в пространстве груза. Грузоподъемные краны разнообразны по конструктивному исполнению и назначению.

По конструктивному признаку их разделяют на краны мостового и стрелового типов. К первым относятся перегрузочные мосты, собственно мостовые краны, мостовые краны-штабелеры, козловые и полукозловые краны, настенные передвижные консольные краны. Краны стрелового типа: башенные, порталные и полупортальные краны, поворотные краны на колонне, а также собственно стреловые передвижные краны – состоят из стрелы, которая закреплена на раме ходового устройства или на поворотной платформе (установлена непосредственно на ходовой раме).

Для транспортировки разнообразных грузов как внутри одного цеха, так и между цехами предприятия, а также для проведения погрузочно-разгрузочных работ на железных дорогах и в портах широко применяются *самоходные погрузчики*. Их используют с целью выполнения операций захвата, вертикального и горизонтального перемещения груза с последующей укладкой его на служащую для этого поверхность.

Последнее время все большее применение получают склады с многоярусными стеллажами (вертикальные склады), где в ячейки устанавливают упакованный груз. Подобная многоярусная система содержания грузов приводит к значительной экономии площадей. Для производства погрузочно-разгрузочных работ с такой системой хранения грузов удобно использование погрузчиков. Они служат для осуществления всего комплекса работ по штабелированию транспортированию и грузов. Однако при наличии узких проходов между стеллажами, применение

									Лист
									10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

5) По количеству стоек:

- Безстоечные – крепятся к окружающим предметам;
- Одностоечные;
- 2-стоечные.

Выбор определенного вида ГПМ для производства необходимых операций производят на основе изучения разных обстоятельств, включающих характеристики перемещаемого груза, режим работы, требуемую грузоподъемность, вид энергии, приводящей машину в действие и т.д.

Из представленных выше видов ГПМ в качестве объекта изучения выбран подъемник, а согласно обобщенной классификации – стационарный грузовой мобильный одностоечный подъемник с электрическим приводом.

Область применения подобного подъемного механизма достаточно широка: это строительство и ремонт, отделочные и штукатурные работы, погрузочно-разгрузочная работа на складах, в аэропортах, на заводах и производственных предприятиях, ремонт и строительство судов, сервисные работы по обслуживанию техники. Основное функциональное назначение подъемников – подача различных грузов и рабочего персонала [2].

Исходя из этого можно сформулировать основные требования, предъявляемые к исследуемому подъемнику:

- простота использования;
- надежность;
- производительность;
- экономичность;
- безопасность для обслуживающего персонала;
- способность к ремонту;
- соответствие заявленным характеристикам и т.д.

При проектировании систем АЭП подъемно-транспортных механизмов нужно учитывать ряд специфичных требований [96, 97]:

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

3. Присутствие S-образного задатчика интенсивности, который был бы в состоянии обеспечить плавное движение при разгоне и торможении ЭП за счет амортизации участков траектории разгона и торможения (начальных и конечных).

4. Интерфейс и конструктивное исполнение ПЧ должны быть адаптированы под конкретные условия применения. В частности, возможность управлять механическим тормозом двигателя, контактором со стороны двигателя, а также поддерживать сигналы от станции управления объектом.

5. Возможность рекуперации энергии в питающую сеть при работе привода в тормозных режимах.

6. Соответствие нормам по ЭМС, предъявляемым к приводам некоторых ГПМ.

7. Повышенная надежность преобразователя.

Помимо указанных выше параметров важен еще способ, с помощью которого регулируется скорость. В зависимости от этого электропривод имеет те или иные энергетические, экономические и технические показатели.

Цель данной выпускной квалификационной работы - проектирование автоматизированного электропривода стационарного грузового мобильного одностоечного подъемника с электрическим приводом с повышенной точностью позиционирования груза.

									Лист
									14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ

Стационарные одностоечные подъемники не требуют особых условий установки. Они могут устанавливаться как в помещении, так и вне его, но при условии отсутствия воздействия суровых внешних условий (дождь, град, снег, повышенная скорость ветра). Также не требуется стабильная питающая сеть. При использовании важно, чтобы площадка под подъемником должна быть достаточно ровной.

Проектируемый подъемник рассчитан на работу в условиях воздействия:

1. температуру окружающей среды от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
2. относительной влажности воздуха до 85%;

атмосферного давления от 86500 до 106000 Па (от 650 до 800 мм. рт. ст).

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

1.2 КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА

На рисунке 1.1 изображена кинематическая схема одностоечного подъемника.

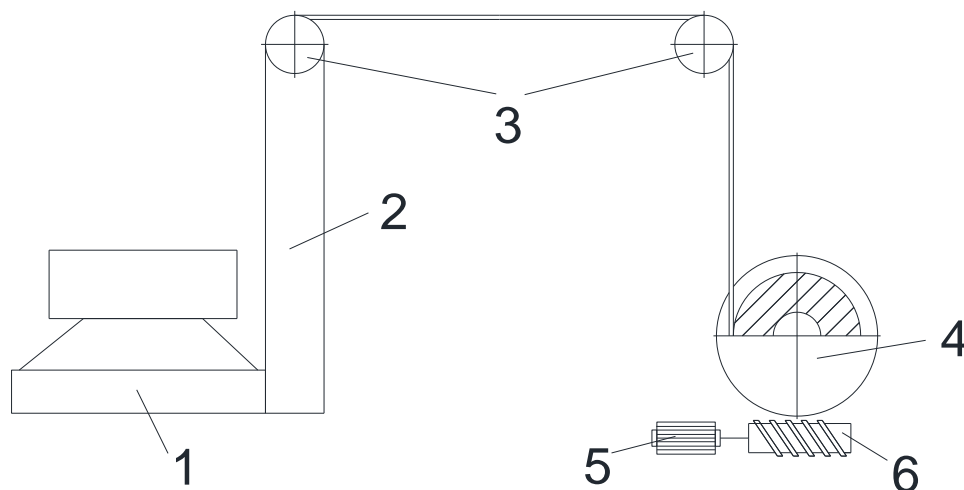


Рисунок 1.1 – Кинематическая схема одностоечного подъемника:

1 – тележка; 2 – стойка; 3 – опорные ролики; 4 – барабан;

5 – двигатель М1; 6 – червячный редуктор

Согласно кинематической схеме одностоечный подъемник состоит из тележки, опорных роликов, червяка, барабана и двигателя М1.

Принцип работы системы: при подаче напряжения сети двигатель М1 начинает вращаться и вместе с тем вращать червячный редуктор, который в свою очередь начинает приводить в движение барабан. Вращаясь, барабан наматывает жестко закрепленный канат, который расположен на опорных роликах. Чем дольше канат наматывается на барабан, тем выше поднимается тележка. При достижении заданной высоты барабан перестает наматывать канат и останавливается, останавливая тем самым подъем тележки. Опускание тележки происходит в обратном порядке.

1.4 ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Таблица 1.1 – Исходные технические данные подъемника

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
m_T	Масса тележки	т	1
m_G	Масса груза	т	0,7
h	Высота подъема	м	16
$D_б$	Диаметр барабана	м	0,58
v_n	Скорость подъема	м/с	0,7
$v_о$	Скорость спуска	м/с	0,7Г
J_{PT}	Момент инерции роликов и троса	кгм ²	20
$J_{БК}$	Момент инерции барабана с червячным колесом	кгм ²	250
$J_{ЧМ}$	Момент инерции червяка и муфт	кгм ²	0,2
$i_ч$	Передаточное число червячной пары	-	20

Принять:

$a_{доп} = 0,2 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение рабочего органа;

$\mu_{п} = 0,05$ – коэффициент трения в подшипниках;

$d_{сб} = d_{ср} = 0,15 \text{ м}$ – диаметр ступицы барабана и ролика;

$\eta_{п} = 0,7$ – КПД червячной пары;

$z = 50 \text{ 1/ч}$ – включений в час.

2 ОПИСАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Режим работы подъемников – это распределение календарного времени на их основную работу и перерывы по различным причинам. Рабочее время - время, которое затрачивается на выполнение технологического процесса и неизбежные технологические перерывы (установка различных сменных грузозахватных приспособлений), перерывы для сдачи-приема смены и выполнение технического обслуживания.

Во время работы подъемников возможны перерывы (максимально допустимая длительность – 0,5 часа на смену), возникающие по многим причинам: падение напряжения в питающей сети, нарушение процесса осуществления технологии, человеческий фактор и т.д.

При определении режимов работы классифицируют три периода календарного времени: сменный, суточный и годовой, в соответствии с чем, режим работы бывает сменным, суточным и годовым.

Сменный режим работы (первый из указанных) зависит от самой машины, ее типа и грузоподъемности. Такой режим работы предусматривает распределение сменного времени на 2 части: в первой части времени машина выполняет необходимые операции, во второй – простаивает (перерывы в работе). Части сменного режима работы разделены на отрезки и чередуются.

Сменный режим грузоподъемных механизмов, в том числе подъемников, зависит от конкретных условий.

										Лист
										20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					



Рисунок 1.2 – График сменного режима работы одностоечного подъемника (типовой)

Суточный режим – такой режим работы, который определяет необходимо возможное число смен работы подъемника в течение суток. Их количество, в первую очередь, зависит от принятой организации работ на производстве.

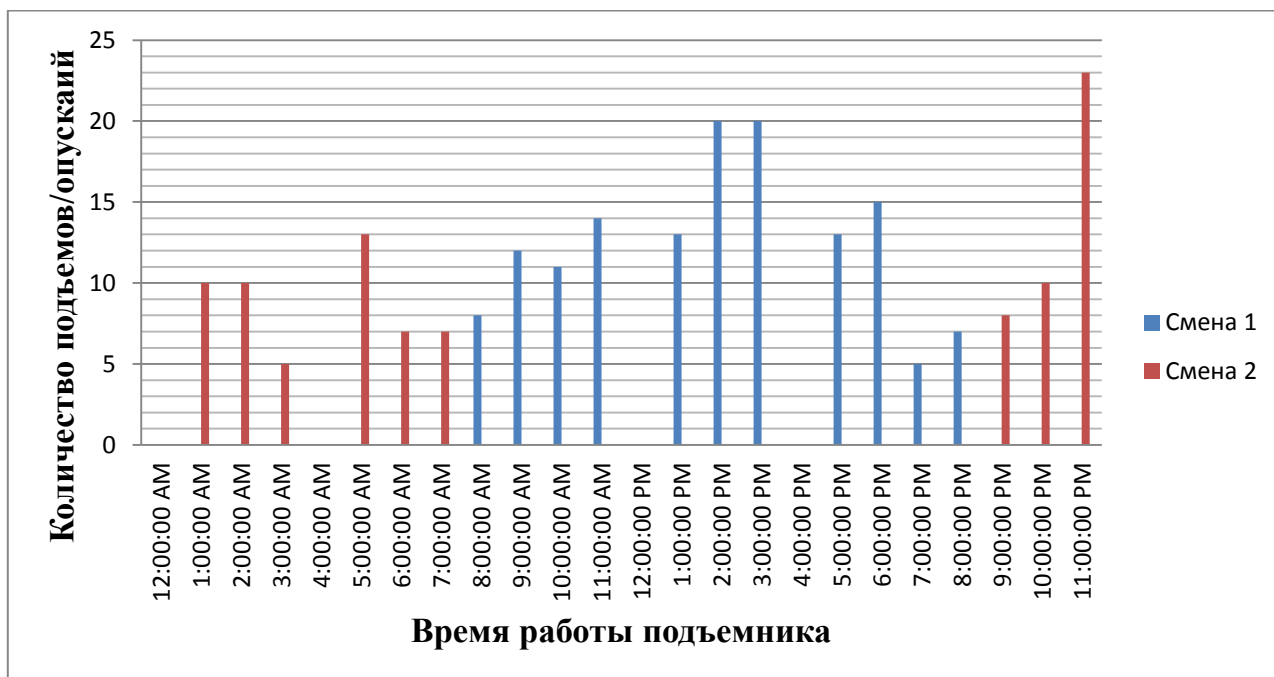


Рисунок 1.3 – График суточного режима работы одностоечного подъемника (типовой)

Годовой режим работы различают для конкретных условий эксплуатации подъемника, но при это учитываются такие факторы как район строительства и расположения объектов, мощности и расположения ремонтной базы, эксплуатационные особенности и количество машин. При расчете годового режима учитываются только те перерывы, занимающие целиком смену или сутки.

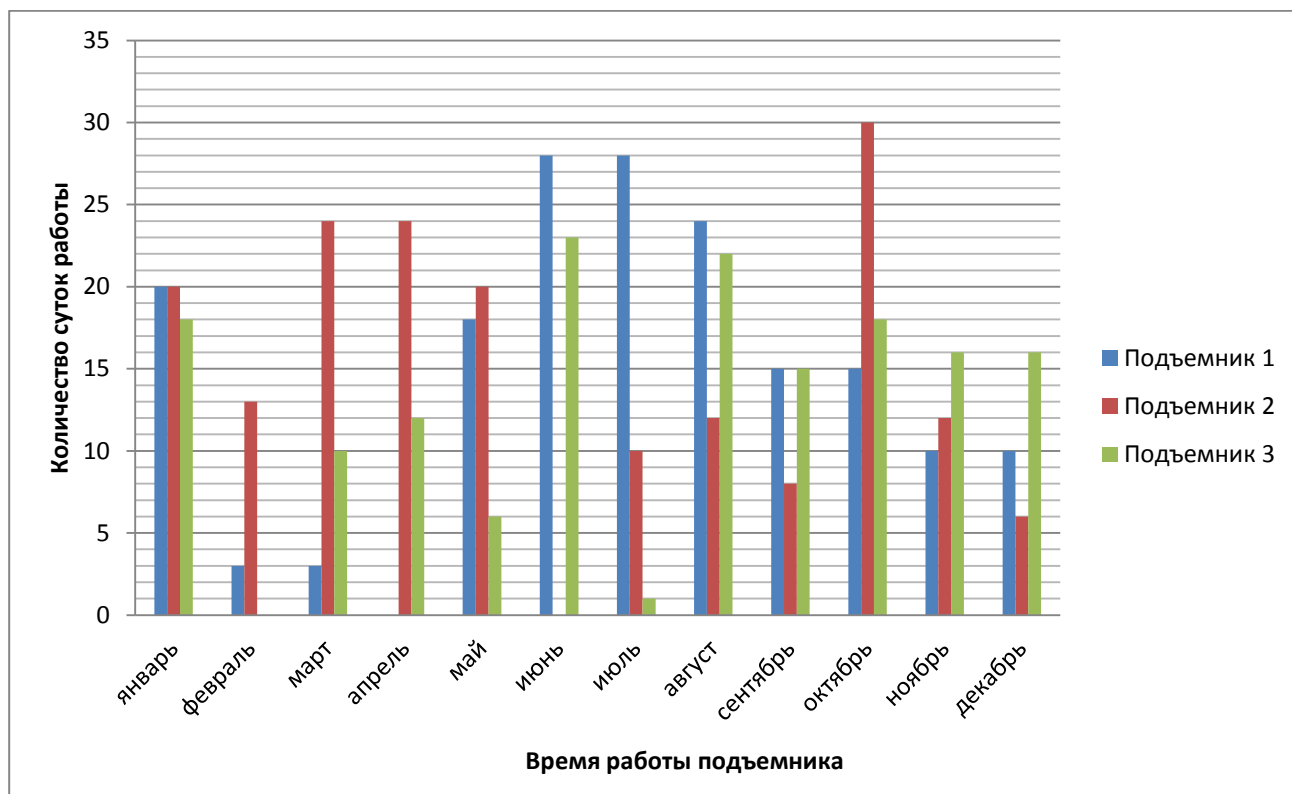


Рисунок 1.4 – Годовой режим работы подъемников (типовой)

Также следует учитывать, что проектируемый подъемник должен обеспечивать эффективную работу на пониженной и нормальной скорости.

Таким образом, на основании указанной выше классификации одностоечный подъемник невозможно классифицировать по причине того, что он может во всех режимах в зависимости от условий цеха [5].

3 РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 КАЧЕСТВЕННЫЙ ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В рамках выпускного проекта бакалавра мною на основании технических данных для проектирования п. 1.4 были рассчитаны и построены предварительные нагрузочные диаграммы.

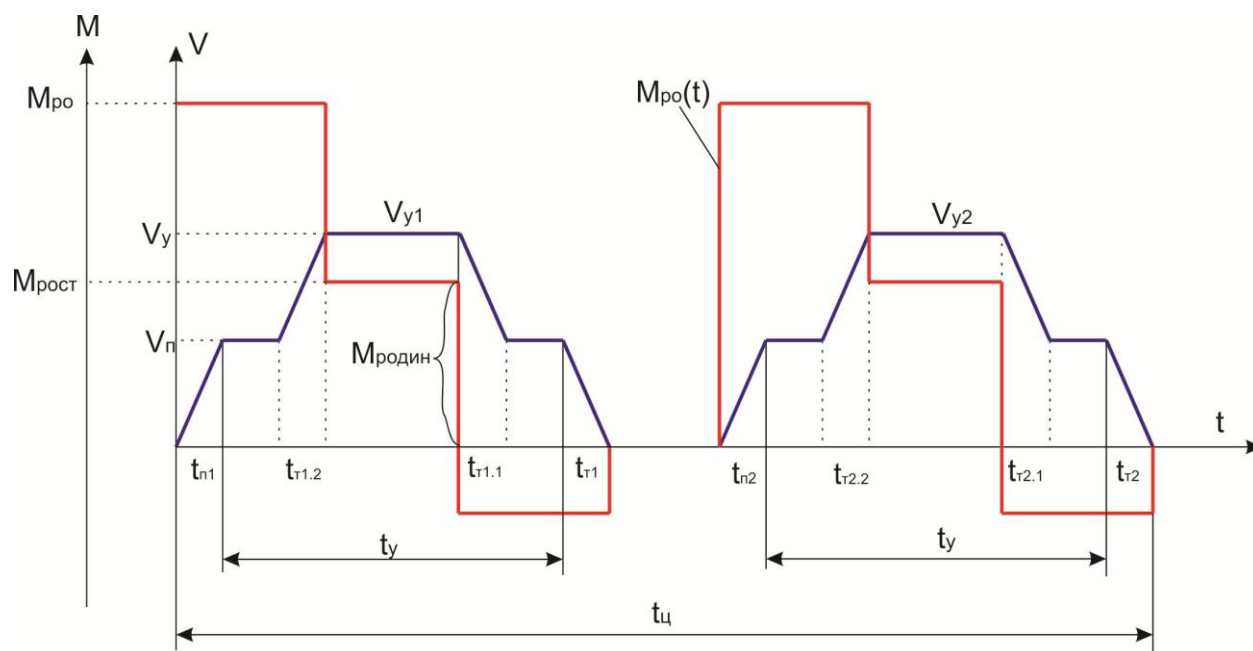


Рисунок 3.1 – Предварительные нагрузочные диаграммы

По рассчитанной мощности выбран основной и резервный электродвигатели – асинхронный двигатель Leroy-Somer серии LS PLS 180L из каталога [6]. Номинальные данные двигателя приведены в таблице 3.1.

Особенности выбранного двигателя:

- Облегченный алюминиевый корпус, что позволяет снизить массу электродвигателя более чем на 25% в сравнении с массой электродвигателя в стальном или чугунном корпусе;
- Детали изготовлены из высокопрочных марок стали;
- Большой запас прочности.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Кроме того, выбранный электродвигатель проходит проверку по нагреву, что подтверждается расчетами.

Таблица 3.1 – Номинальные данные двигателя Leroy-Somer PLS 180L

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
P_n	Мощность на валу номинальная при ПВ=100%	кВт	30
n_n	Номинальная частота вращения	об/мин	1450
I_{In}	Номинальный ток статора	А	57,1
$\cos \varphi_n$	Коэффициент мощности в номинальном режиме	--	0,85
I_n	Ток пусковой	А	325,47
M_n	Момент пусковой	Н·м	198
M_{\max}	Момент максимальный критический	Н·м	275,2
η_n	КПД	--	0,892

Также достоинствами выбранного двигателя являются:

- а) повышенная перегрузочная способность;
- б) большие пусковые моменты при сравнительно небольших токах;
- в) малое время разгона.

Кроме того, выбран редуктор Ч–63 [7]:

$i_p = 63$ – передаточное число;

$\eta_p = 0,87$ – КПД;

$M_{\text{крут}} = 128$ Нм – номинальный крутящий момент.

3.2 ВЫБОР РЕГУЛИРУЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В рамках реализации системы ПЧ-АД для регулирования двигателем выбран асинхронный регулируемый транзисторный двузвенный преобразователь частоты Unidrive SP 40T/SP4401, характеристики которого приведены в таблице 3.2 [8].

Таблица 3.2 – Технические характеристики преобразователя Unidrive SP 40T/SP4401

Питающая сеть	3x380 В ($\pm 10\%$)
Частота напряжения на входе	50 (60) $\pm 5\%$
Диапазон изменения напряжения на выходе, $\%U_{\text{вх}}$	(1..100) В
Выходная частота	(0..650) Гц $\pm 0,05\%$
Ток перегрузки	1,5 · $I_{\text{н}}$ в течение 60 с
КПД (без двигателя)	0,9
Коэффициент мощности (сети)	0,908
Полная мощность	37 кВт
Номинальная мощность двигателя	30 кВт
Номинальный ток нагрузки $I_{\text{н}}$	56 А

Особенности ПЧ серии Unidrive SP40T/SP4401:

- 1) открытая структура конструкции делает возможным легко расширить функции привода путем подключения дополнительных модулей - встраиваемого контроллера, модулей входов/выходов, коммуникационных модулей;
- 2) функция автонастройки предоставляет возможность создать точную модель ЭП путем измерения моментов инерции и нагрузки с вращением и без вращения вала;

- 3) ПЧ могут работать от постоянного напряжения (48-96 В), что позволяет применять их в ГПМ;
- 4) встроенный ЭМС-фильтр, слоты для подключения внешнего ЭМС фильтра;
- 5) встроенный в конструкцию дроссель на звене постоянного тока;
- 6) прямой доступ к расширенному и базовому меню при помощи встроенной панели;
- 7) возможность изменения частоты коммутации от 3 до 18 КГц;
- 8) встроенный тормозной транзистор;
- 9) подключение по шине Modbus RTU RS 485 через разъем RJ45 поставляется уже в стандартной комплектации;
- 10) наличие 7 цифровых входов/выходов, 5 аналоговых входов и 1 выход защитного отключения [8].

Благодаря функциональным возможностям сферы применения Unidrive SP достаточно широки, логика электропривода и его динамические характеристики позволяют использовать его в наиболее жестких условиях, причем компактные размеры делают его идеальным решением для установки как в новых, так и в модернизируемых системах.

Также Unidrive SP может работать как рекуператор, и сбрасывать генерируемую при работе приводного механизма энергию в сеть, что позволяет существенно снизить затраты предприятия [9].

Режимы работы Unidrive SP:

- векторный с датчиком обратной связи по скорости;
- векторный без датчика обратной связи по скорости;
- RFC (Rotor Flux Control) режим;
- Серво;
- Вольт-частотный режим;
- Рекуперация [9].

Перегрузочная способность:

- 150% от номинального момента в тяжелом режиме в течение 60 с;
- 175% от номинального момента в тяжелом режиме в течение 40 с.

ПИ/ПИД-регуляторы Unidrive SP:

- ПИД-регулятор скорости;
- ПИД-регулятор процесса;
- ПИ-регулятор момента [9].

Типовые применения:

- Станки для высокоскоростной обработки;
- Краны и подъемные устройства;
- Системы управления лифтов и грузоподъемников;
- Энергосберегающие насосные и вентиляционные системы;
- Ткацкие станки;
- Системы транспортировки и загрузки материалов;
- Полиграфическое производство;
- Машины для обработки пластмасс и резины;
- Производство и обработка металлов;
- Судовые механизмы [10].

										Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

3.3 СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭП

Для построения статических характеристик были произведены расчеты, приведенные в таблице 3.3. Построение характеристик осуществлялось в программе Matlab "haradkz.m".

Таблица 3.3– Расчетные значения для построения статических характеристик

Расчетные параметры		С грузом вверх		С грузом вниз	
Заданные точки					
$\omega_{зад}$	рад/с	151,8	15,21	151,8	15,21
	отн.ед	0,96	0,097	0,96	0,097
M_c	Нм	144,48	141,76	144,48	141,76
	отн.ед	0,73	0,72	0,73	0,72
Расчетные данные					
$\omega_{0зад}$	отн.ед	0,962	0,112	0,962	0,112
fI	Гц	48,1	5,6	48,1	5,6
U_1	В	211,64	24,64	211,64	24,64

Рассчитанные механические, электромеханические, энергетические характеристики, а также полученные переходные характеристики работы системы ПЧ-АД одностоечного подъемника при различных условиях работы приведены на рисунках 3.2 .. 3.6.

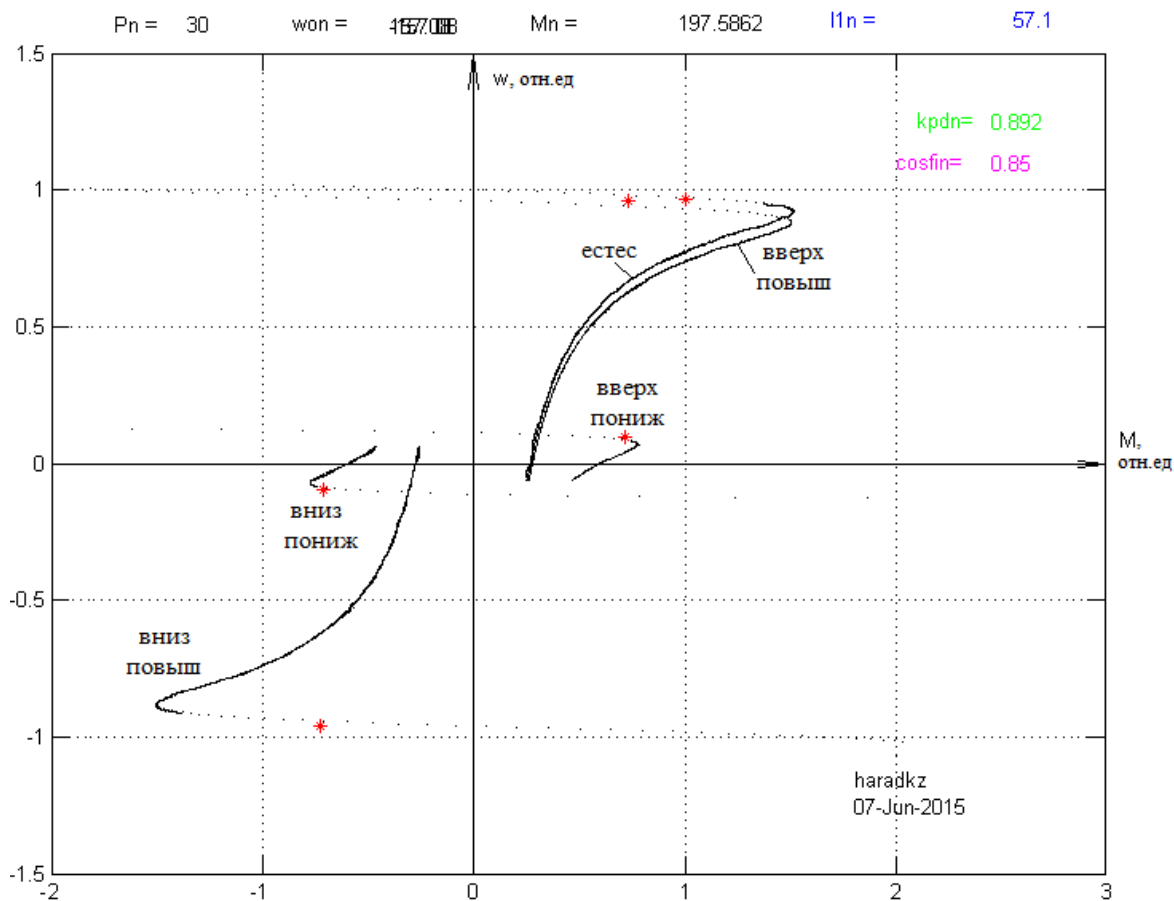


Рисунок 3.2 – Механические характеристики работы подъемника

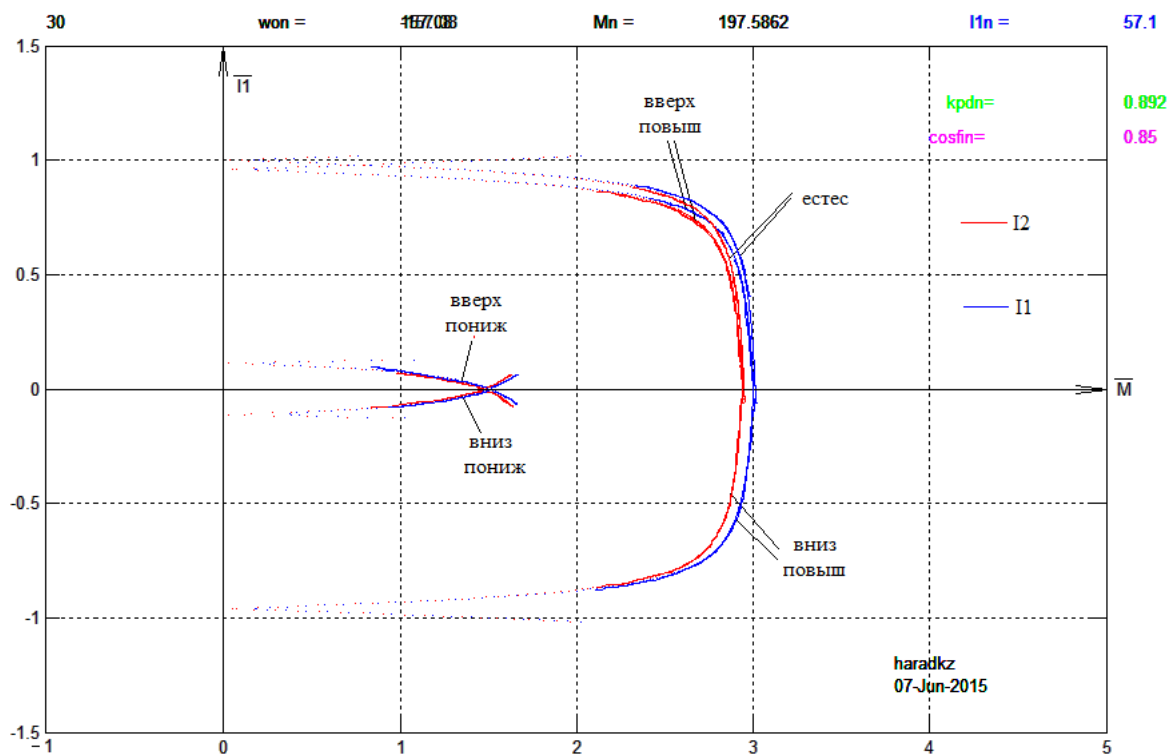


Рисунок 3.3 – Электромеханические характеристики работы подъемника

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Построение динамических характеристик производилось в готовой программе (zipchad.m) ver2012.10.25.

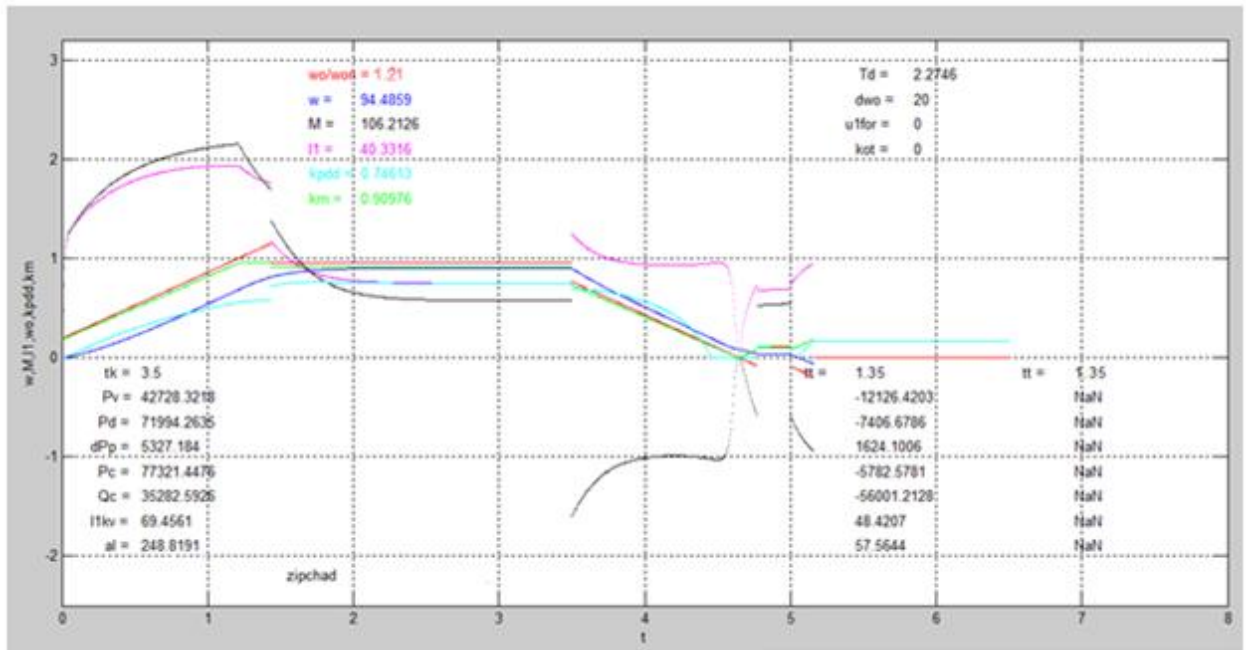


Рисунок 3.4 – Переходный процесс в системе ПЧ-АД при движении вверх

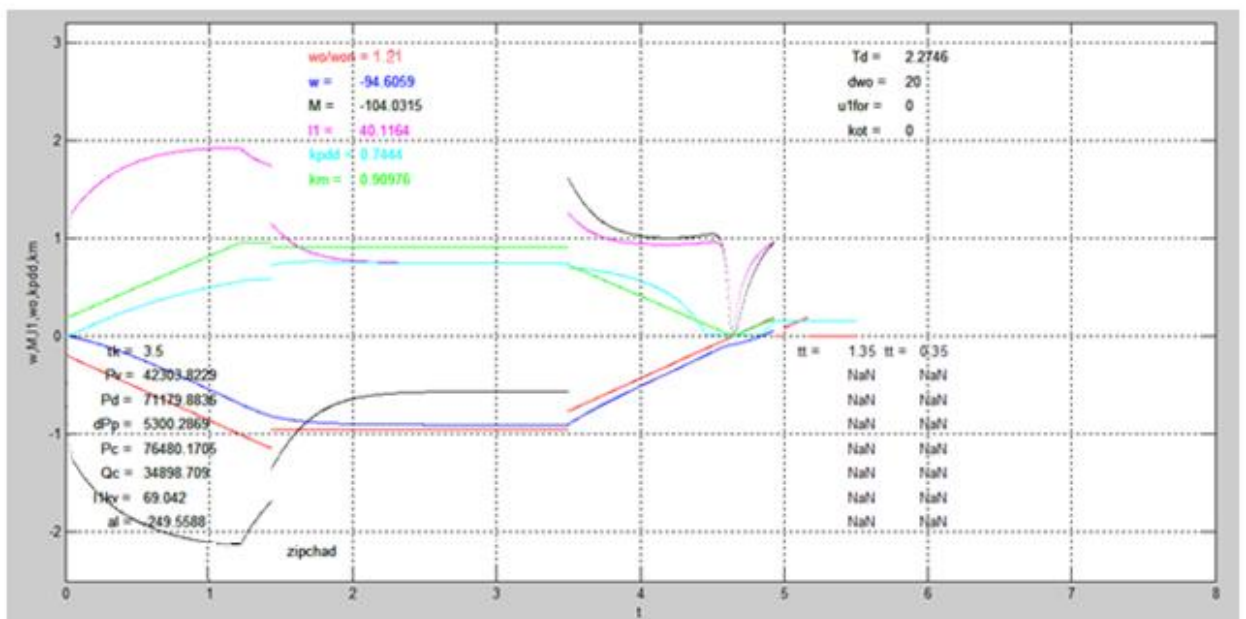


Рисунок 3.5 – Переходный процесс в системе ПЧ-АД при движении вниз

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

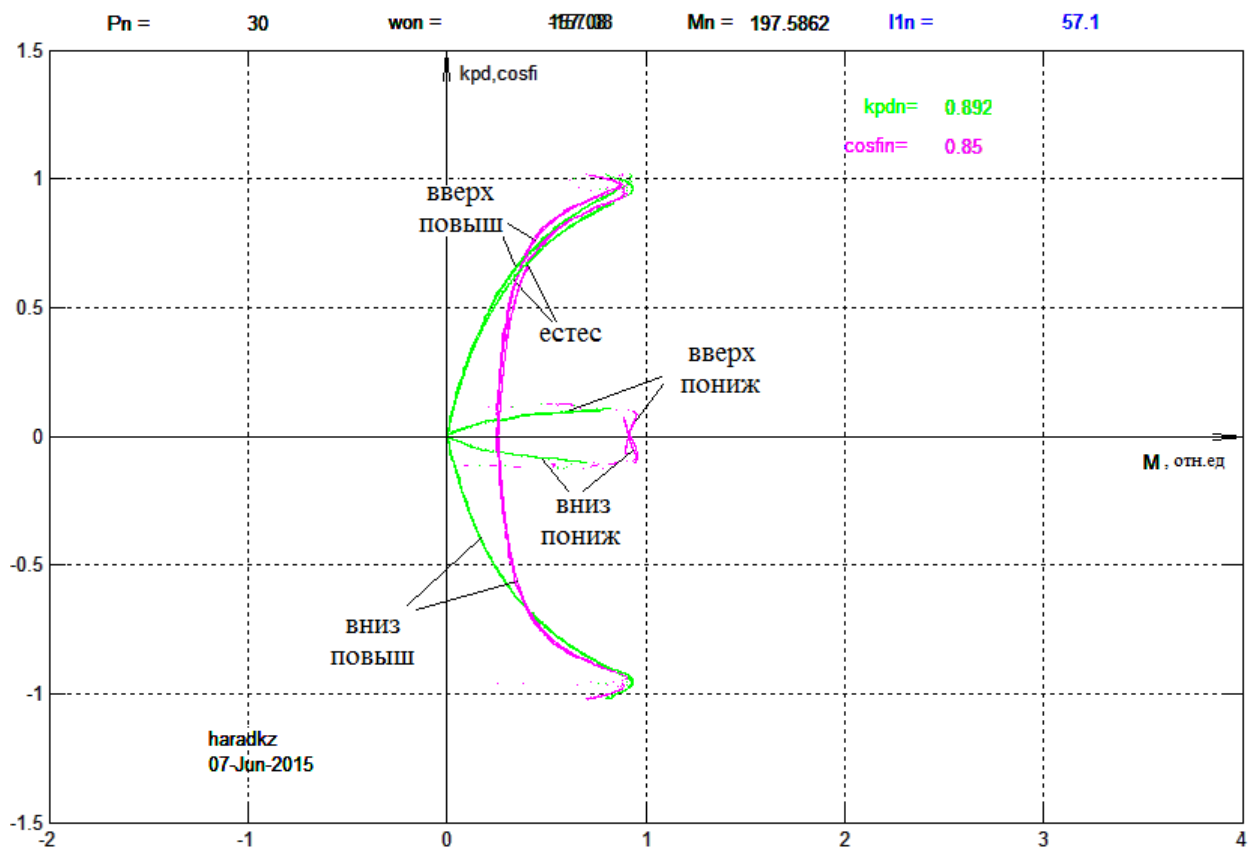


Рисунок 3.6 – Энергетические диаграммы работы подъемника

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

При ручном управлении оператор может включить подъемник принудительно для приведения в начальное положение, при работе же в автоматическом режиме система работает согласно составленному алгоритму.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33

4.1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Движение вверх происходит следующим образом. В исходном положении двигатель находится в П0. При кратковременном нажатии кнопки "Поднять" подхваты из положения П0 на пониженной скорости поднимаются до положения П1, в котором переходят на повышенную скорость до возникновения сигнала с датчика П2. В положении П2 подхваты переходят на пониженную скорость до П3, где останавливаются. Движение вниз возникает в обратном порядке при кратковременном нажатии кнопки "Опустить" и заканчивается достижением положения П0.

									Лист
									34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

"Питание" и "Готовность схемы"- лампа сигнальная светодиодная красная XB4BVB4, для сигнала "Сигнал аварии" - лампа LED зеленая AD22DS) [19, 20].

Внешний вид пульта управления проектируемой системы приведен на рисунке 4.1.

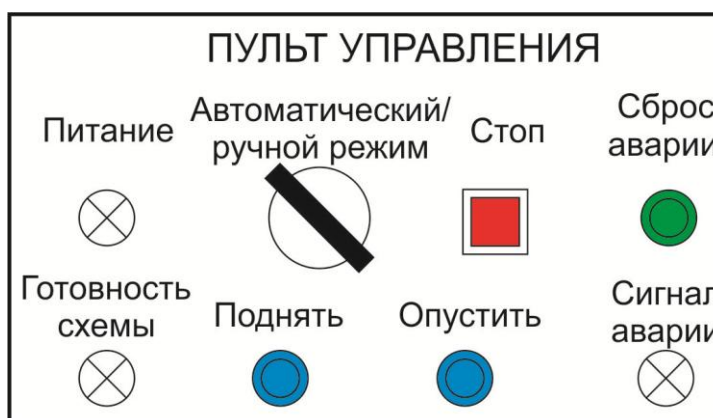


Рисунок 4.1 – Пульт управления подъемником в автоматическом и ручном режимах

Движение вверх

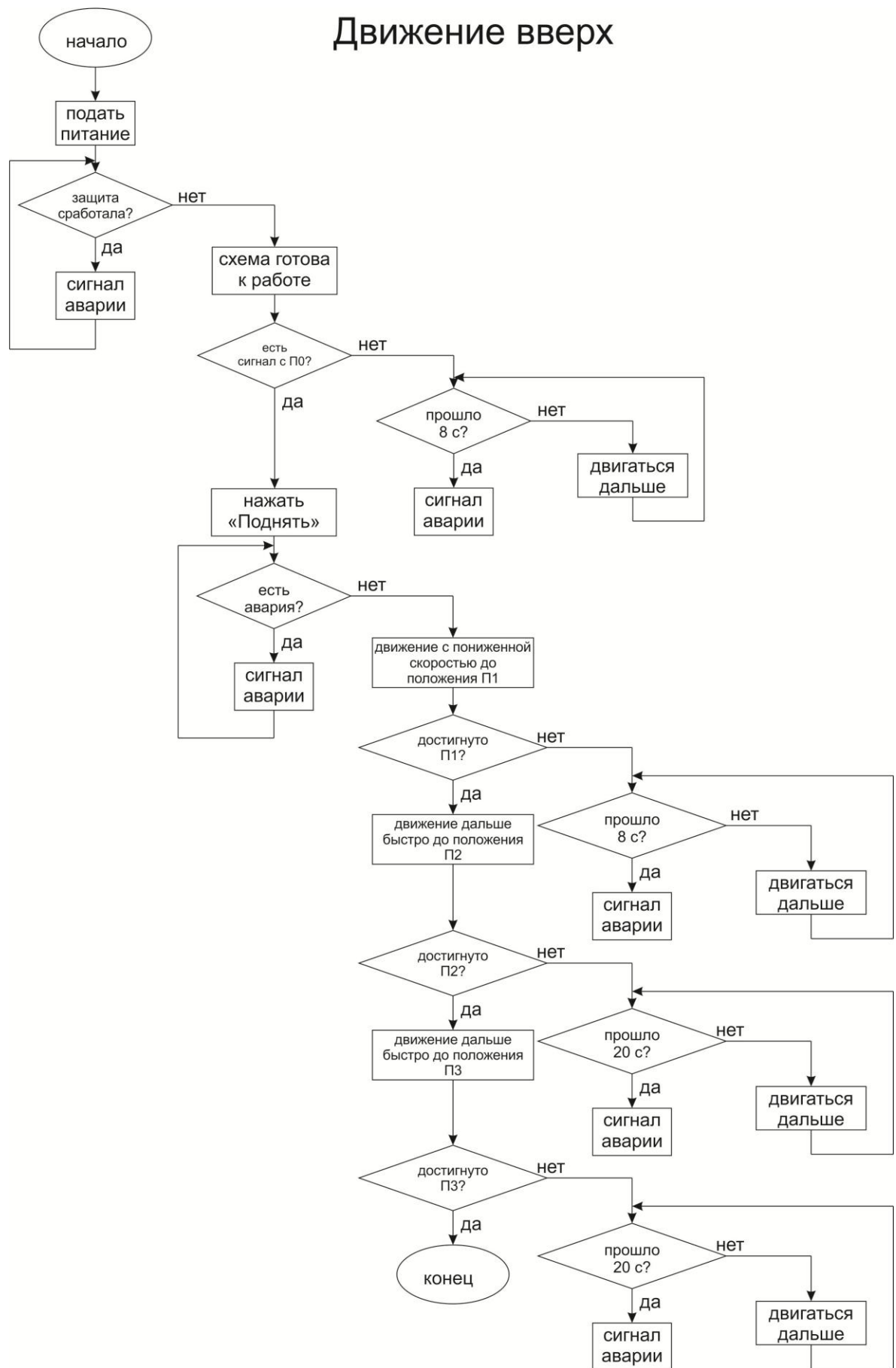


Рисунок 4.2 – Блок схема алгоритма движения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Движение вниз

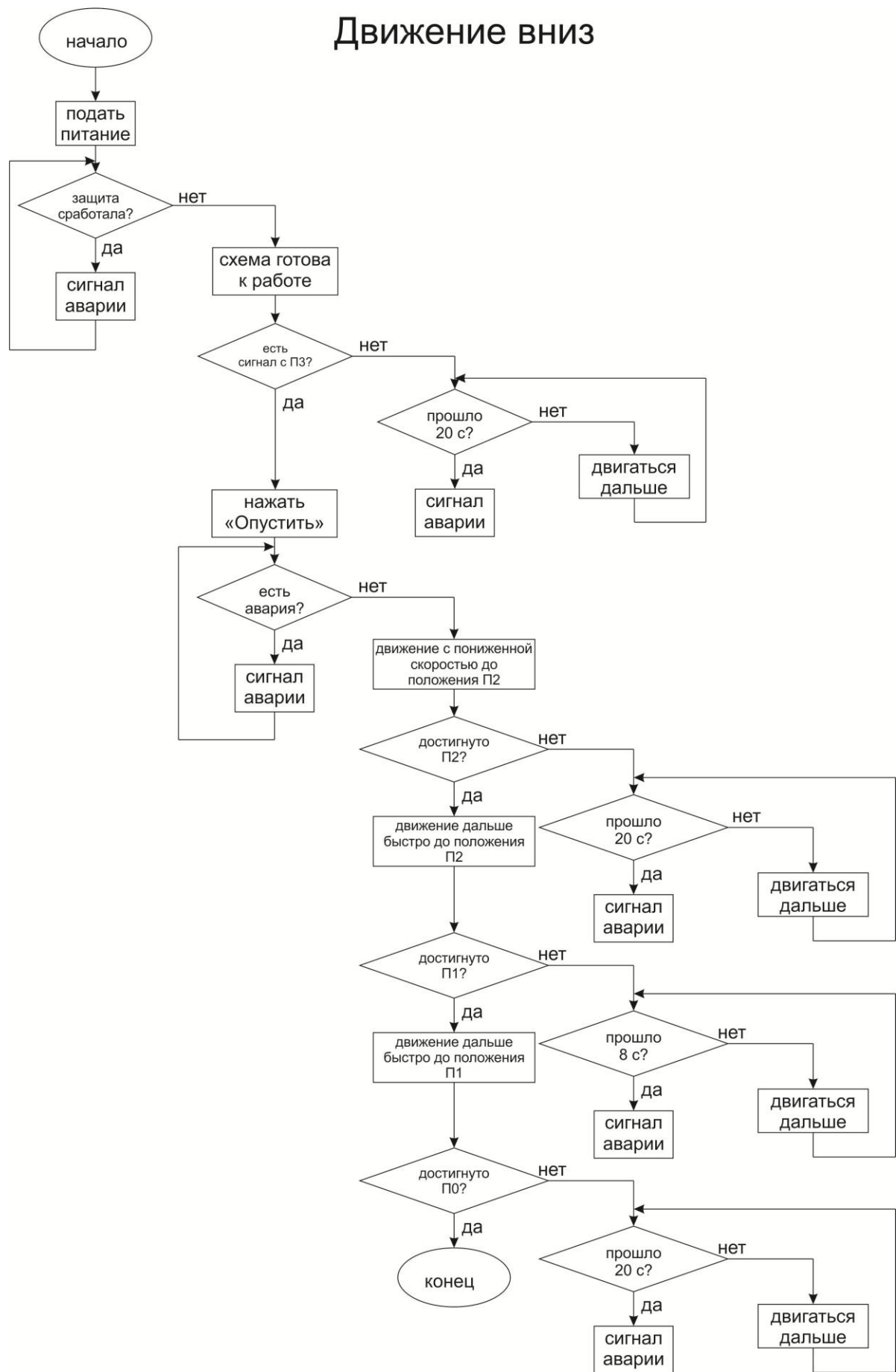


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма движения (окончание)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

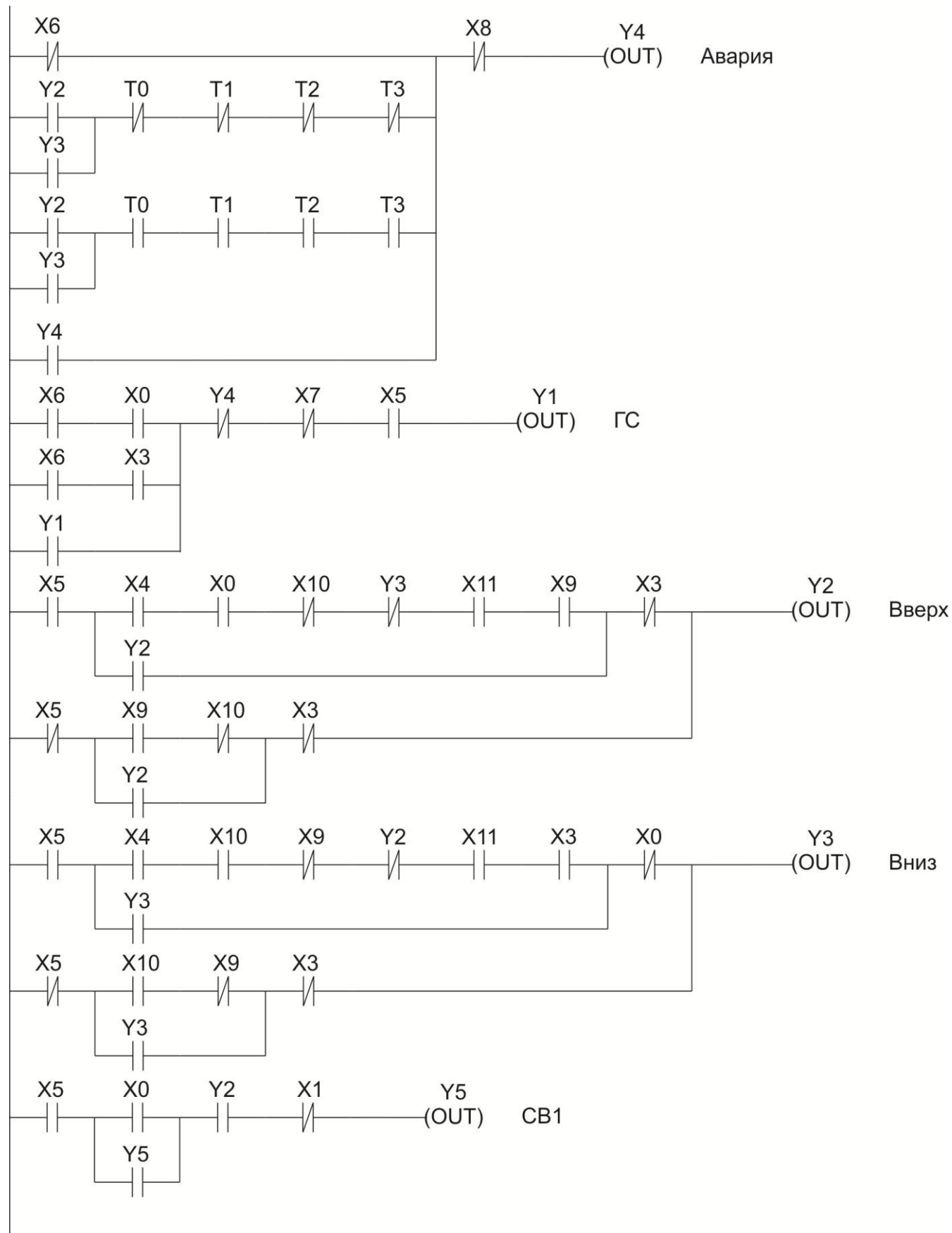


Рисунок 4.3 – Лестничная диаграмма программирования

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

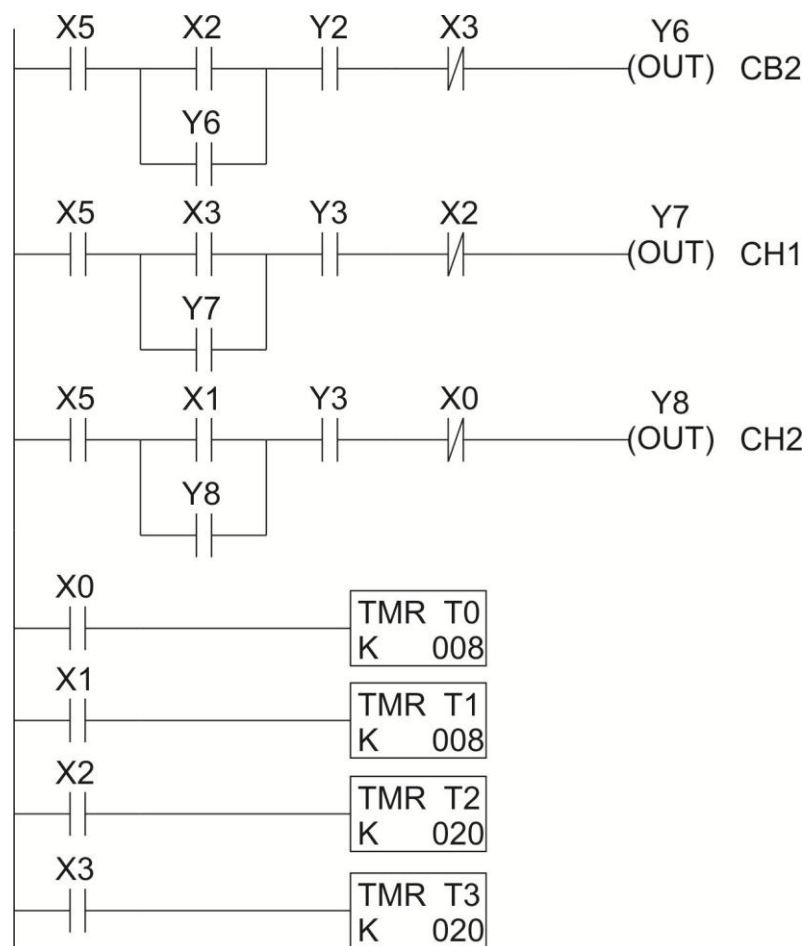


Рисунок 4.3 – Лестничная диаграмма программирования (окончание)

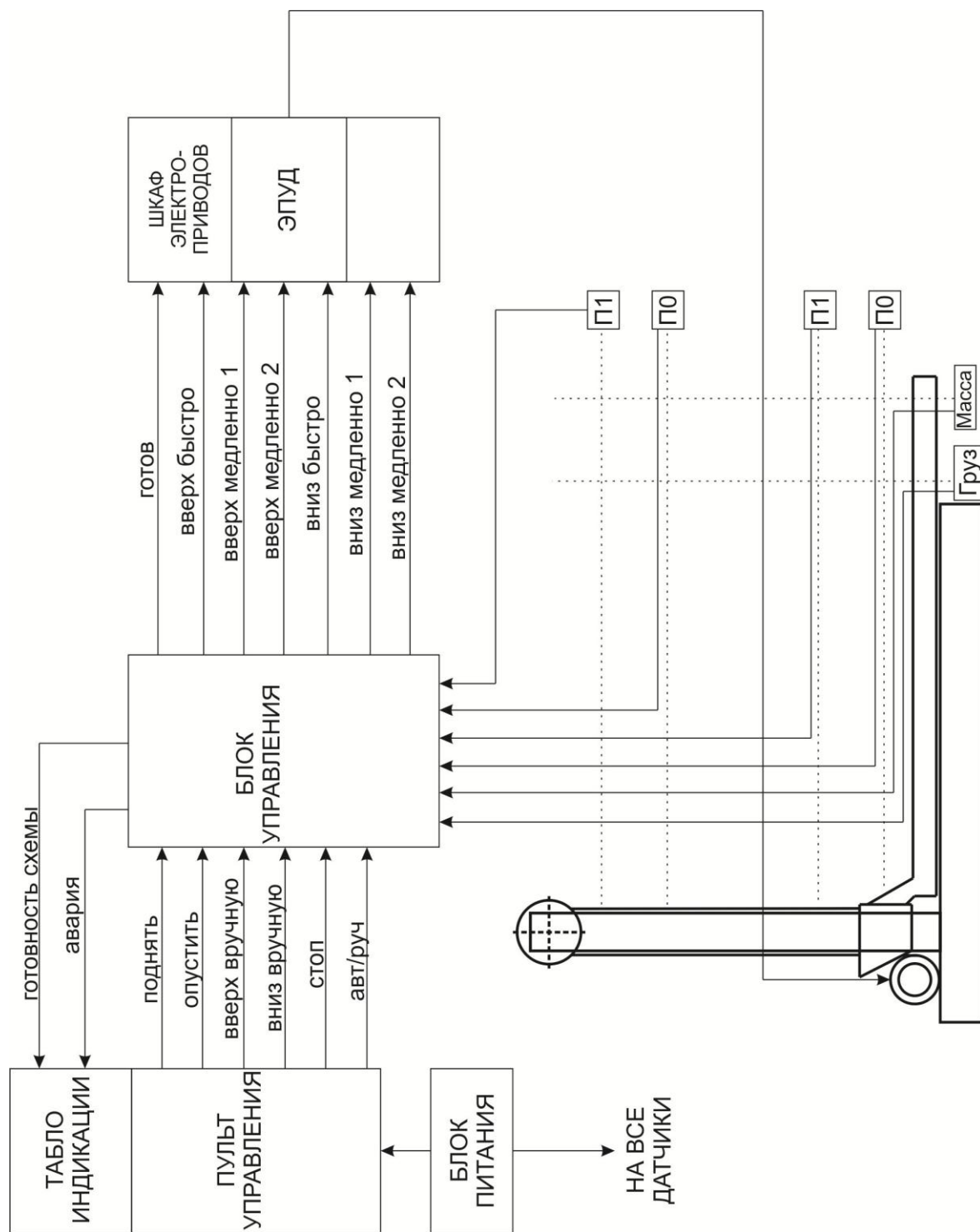


Рисунок 4.4 – Функциональная схема системы автоматизированного одностоечного подъемника

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Из-за того, что подъемник является мобильным, т.е. перевозимым в собранном виде, внедрение подобной системы позволит не только повысить точность позиционирования груза, максимизировать горизонтальность платформы объекта модернизации, но и устойчивость самого ГПМ.

Система стабилизации положения состоит из:

- собственно стабилизатора – обеспечивает фиксацию выставленного положения;
- гироскопа – необходим для установления и регулировки положения платформы после сборки.
- концевого выключателя – определяет, опущен ли стабилизатор на поверхность установки или нет. Если один из стабилизаторов не будет установлен или установлен неверно, то концевой выключатель не включит цепь управления подъема и, соответственно, подъемник работать не будет. Эта система безопасности сводит к минимуму человеческий фактор и, как следствие, повышает безопасность эксплуатации подъемника.

Выставление прицепного подъемника в горизонтальной плоскости осуществляется рабочим как правило вручную, при помощи установленного на платформе жидкостного гироскопа. Многие модели подъемников оборудуются электронным гироскопом, который блокирует работу подъемника, в случае его неправильной установки, а также подает постоянный звуковой сигнал при наклоне подъемника более 3 градуса от горизонта. Существуют также современные модели подъемников, у которых выставление стабилизаторов и выравнивание подъемника по горизонту происходит автоматически, без участия человека [117].

Применительно к одностоечному подъемнику целесообразно использовать аналоговый двухстепенной гироскоп. Это позволит минимизировать вероятность чрезвычайной ситуации.

Масса поднимаемых грузов различна и колеблется в пределах от нуля до максимально допустимого по техническим требованиям. В связи с этим при установлении и последующей работе подъемника возможно небольшое отклонение его от вертикального положения. Подобное колебание оказывает негативное влияние на точность позиционирования груза и устойчивость всей системы. Для минимизации этих ошибок, небольшие величины которых обслуживающий персонал не сможет увидеть, необходимо добавление системы, способной автоматически, без участия человека, выставить стабилизаторы, выравнить подъемник по горизонту и контролировать его равновесие. На это способна система, которая, как было сказано ранее, не содержит датчики. Такие системы называются бездатчиковыми, их особенности и классификация описаны ниже.

Сферы применения этих ЭП определяются нижеприведенными условиями:

- 1) РМ предъявляет высокие требования к быстродействию ЭП;
- 2) В ЭП необходимо регулирование электромагнитного момента на валу ЭД;
- 3) Широкий диапазон регулирования (не более 100) и высокая статическая прочность не нужны;
- 4) Из-за некоторых причин (технологические или другие ограничения, условия эксплуатации) монтаж энкодера (датчика скорости) на вал ЭД невозможна.

Типичными объектами, где используются бездатчиковые ЭП, являются ЭП ГПМ [44], экструдеров, работающих в пожаро- и взрывоопасных, радиоактивных и химических средах, в условиях повышенных вибраций и ударных механических нагрузок [41].

Основные преимущества внедрения бездатчиковой системы:

- Понижение стоимости обслуживания ЭП за счет отсутствия затрат на покупку и установку датчиков с одновременным повышением эксплуатационных характеристик (срок службы, экономия ресурсов и т.д.);

										Лист
										45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

– упрощение его конструкции;

Недостатки этих систем:

– в связи с большими объемами вычислений возникающая сложность алгоритмической реализации;

– из-за ненаблюдаемости системы при низких скоростях (близких к нулю) ограниченный диапазон вращения [101].

									Лист
									46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

2.3 ЭДС, наводимой в статоре полем ротора.

3. Прочие методы.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	Лист
						49
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

В [27] представлено устройство оценивания параметров АД. Реализован аналогичный метод идентификации. Устройство позволяет оценивать активные сопротивления фаз статора и ротора, индуктивности фаз статора и ротора, взаимную индуктивность, момент инерции, статический момент, а также токи ротора.

В настоящее время большое внимание уделяется бездатчиковым электроприводам. Особое значение подобные электроприводы имеют в установках, работающих в особо опасных условиях (пожаро- и взрывоопасные, химических и радиоактивных средах, в условиях повышенной механических нагрузок). В таких электроприводах, в основном, применяются двигатели без датчиков механических переменных.

В рамках указанного направления развития ЭП ведутся исследования и разрабатываются методы бездатчикового измерения скорости. Эти методы позволяют производить оценку скорости косвенным путем через доступные для измерения электрические переменные.

Бездатчиковые алгоритмы векторного управления используют в электроприводах, не требующих предельного быстродействия. Они работают чаще всего в установившемся режиме, не обладают широкими диапазонами регулирования скорости (до 1:100).

Таким образом, возникает необходимость идентификации параметров и переменных величин АД на основании информации о токах и напряжениях фаз обмотки статора без использования датчиков механических переменных [49].

Определение скорости с минимальным использованием датчиков, т.е. бездатчиковое, возможно реализовать с помощью различных методов.

											<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>						<i>52</i>

Сложность этих методов в значительной степени определяется требованиями к точности измерения и диапазону регулирования скорости ЭП [51]. В [52] приведена классификация, в соответствии с которой методы определения скорости асинхронного двигателя подразделяются на пять групп (см. рис. 5.1).

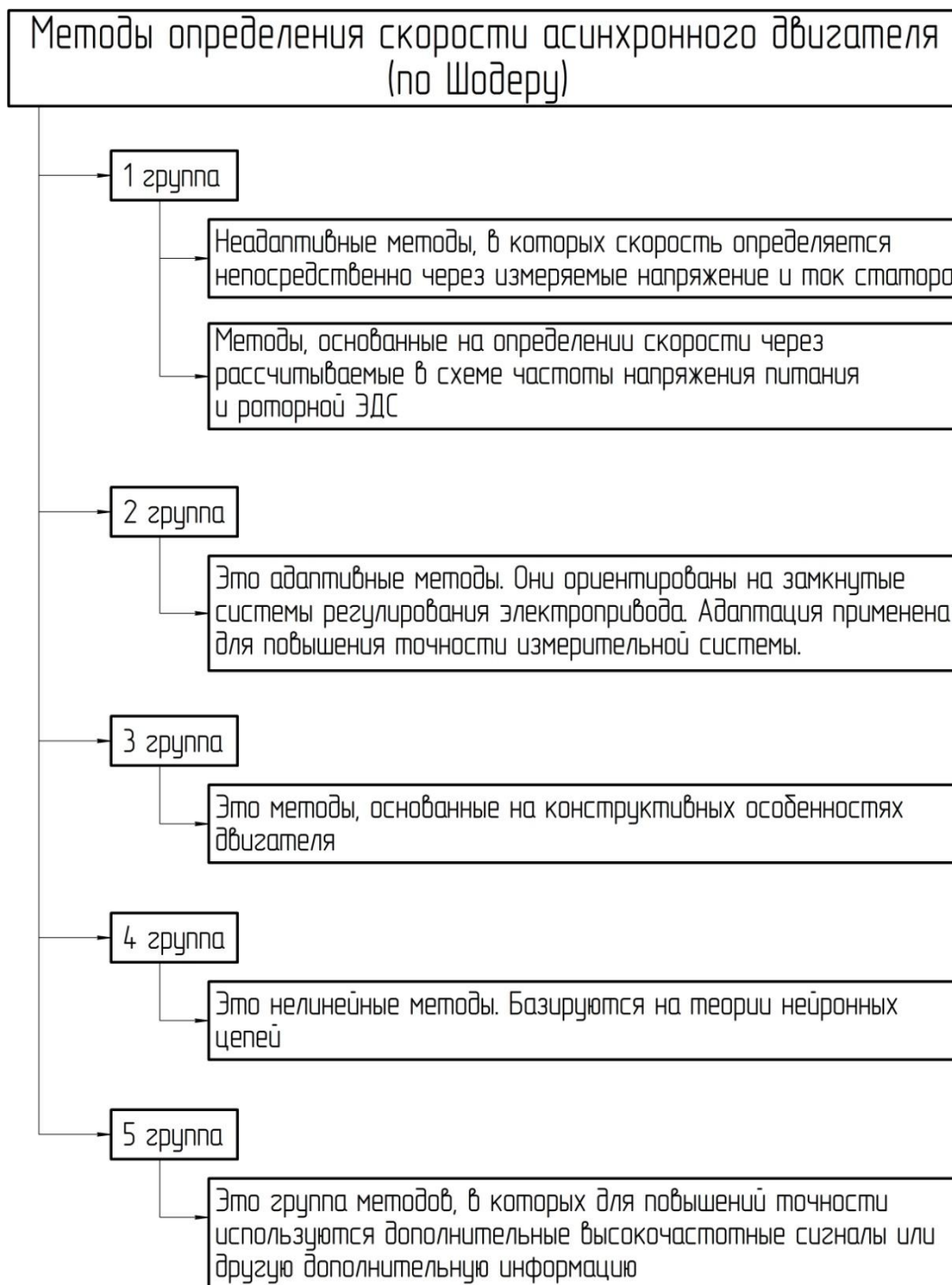


Рисунок 5.1 – Классификация методов определения скорости по [52]

В основу принципа построения схем бездатчикового определения скорости положено векторное математическое описание АД в неподвижной системе координат. Скорость может рассчитываться через величины, записанные во вращающейся системе координат, в неподвижной системе координат, в неподвижной и во вращающейся системах координат.

В [53] рассматривается способ оптимальной оценки скорости АД и система для его реализации.

Оценка скорости двигателя осуществляется на основании измеряемых текущих значений напряжений и токов статора двигателя. Далее производится прямое и косвенное вычисления значений реактивной мощности, пропорционально-интегральное преобразование на основе минимизации критерия качества, определяемого по сохраненным ранее двум предыдущим значениям оценки частоты вращения и разности значений прямого и косвенного вычислений реактивной мощности.

В [54] предложен способ определения оценки частоты вращения АД.

Оценка частоты вращения осуществляется на основании измеряемых мгновенных величин токов и напряжений статора АД с помощью предварительно обученной искусственной нейронной сети.

Анализ данных, предоставляемых производителями преобразователей частоты, показывает, что бездатчиковые ЭП производятся серийно многими фирмами [49, 55-57]. При этом характеристики большинства этих приводов оказываются недостаточными для широкого использования. В частности, полоса пропускания контура скорости, как правило, не превышает 5-7 Гц, а общий диапазон регулирования скорости (вверх и вниз от номинальной) не более 20-100. Это может быть с легкостью достижимо в системе частотного управления, где применена векторная ориентация переменных в установившихся режимах работы [115]. На практике фирмы-производители ПЧ даже не заявляют в поставляемой технической документации диапазон регулирования скорости и полосу пропускания.

Поэтому получить эту информацию удастся возможным только в результате проведения стендовых испытаний [114].

Таблица 5.1 – Общие сведения о реализации методов косвенной оценки в преобразователях частоты разных производителей

Фирма-производитель ПЧ	ПЧ с заложенным бездатчиковым ЭП	Особенность
ABB	ACS350	Функция бездатчикового векторного управления
	ACS1000	Функция непосредственного управления моментом (DTC)
Control Technics	Серия Commander SK	Предназначены для управления АД без датчика обратной связи
Siemens	Micromaster 440	Встроена функция бездатчикового способа векторного регулирования (Vector Control Sensoreless). Применяются для процессов с высокой динамикой и повышенными требованиями к стартовому моменту и перегрузке
Mitsubishi Electric	Серия FR-A740	Реализована система бездатчикового векторного регулирования (Real Sensorless Vector Control)
	FR-D700	Встроенная коррекция изменяющихся в процессе работы параметров
ООО «ЭЛПРИ» Чебоксарского аппаратного завода	Серия ЭПВ	Это – бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления

5.3 АДАПТИВНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ

Анализ традиционных принципов построения систем автоматического регулирования с точки зрения их чувствительности к факторам, изменение которых во времени не поддается прямому контролю и существенно влияет на качество процессов регулирования, позволяет сформулировать физические идеи компенсации нежелательного влияния этих факторов.

Такой подход к анализу свойств автоматических систем дает основание для отнесения систем, построенных по принципам отклонения от возмущения, к адаптивным или приспособляющимся, однако в каждом конкретном случае адаптация, т.е. приспособление к изменяющимся условиям среды, имеет ограниченный характер. Подобная точка зрения на свойства обычных систем с обратными связями высказывалась давно и различными авторами, в частности Дж. Тракселом [24], но различия в степени проявления адаптивных свойств таких систем не всегда принимаются во внимание при синтезе адаптивных систем.

Анализ примеров технических процессов, где имеется необходимость в управлении с адаптацией, и их особенностей, приводит к такому принципу построения адаптивных систем, где цель – оптимальное управление объектом (процессом), не чувствительность к изменяющимся неконтролируемым образом условиям работы системы, а средством для достижения этого свойства – адаптация регулирующего устройства системы (регулятора) к изменениям условий. Следование этому принципу приводит к синтезу адаптивных систем на основе метода последовательного раскрытия неопределенностей причинно-следственных связей модели «объект – внешняя среда», наиболее полно проявляющегося в классе самонастраивающихся систем [23].

										Лист
										56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Адаптивные автоматические системы служат для управления объектами (процессами) в условиях текущей трансцендентальной неопределенности в описании моделей объектов и внешних возмущений (внешней среды), в то время как эта неопределенность оказывает достаточно сильное влияние на качество управления и его результаты. Возникновение трансцендентальной неопределенности происходит уже на стадии формирования модели автоматизируемых объектов и процессов. Текущая неопределенность обусловлена неконтролируемым, имеющим случайный характер изменением статических и динамических свойств управляемых объектов и воздействий внешней среды на объект в режиме нормальной эксплуатации. Такая ситуация характерна для многих технических приложений, в частности для объектов технологических процессов (ТП), где замкнутые системы, и в том числе адаптивные, являются подсистемами управления в составе автоматизированной системы управления. Успешное функционирование подсистем в значительной мере зависит от достоверности информации о свойствах управляемых объектов и процессов. Если такая информация и характеристики управляемых объектов и воздействий внешней среды изменяются незначительно во времени или же эти изменения несущественно сказываются на конечном результате управления, то эффективное решение его задач может и должно быть выполнено с помощью традиционных методов теории управления и соответствующими техническими средствами.

Однако существует множество объектов и процессов почти во всех отраслях науки и техники, промышленности, которые отличаются тем, что их статические и динамические свойства изменяются неконтролируемым образом, а априорные сведения об этих изменениях и о самих физических, математических и расчетных моделях «объект - внешняя среда» лишь в определенной степени соответствует действительности.

										<i>Лист</i>
										57
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>					

Например, такая ситуация возникает тогда, когда принимаются упрощающие допущения, которые снижают эффективность расчетной модели системы управления, построенной по традиционным методам. В этих случаях практический результат управления не соответствует расчетному или же является совсем непригодным, и возникает потребность в методах управления, учитывающих наличие текущей трансцендентальной неопределенности. Бесспорен тот факт, что при этом адаптивные методы и соответствующие им технические возможности должны гарантировать необходимое качество процесса управления и симметрию регулируемых переменных, соответствующих им критериев качества или других характеристик СУ по отношению к несомненно существующим неконтролируемым изменениям динамических и статических свойств объекта и воздействий внешней среды при текущей трансцендентальной неопределенности рассчитываемой модели «объект – внешняя среда».

Обычно синтез автоматических СУ приводится в исполнение на основании известной расчетной модели объекта (процесса). Синтез СУ проводится на основании полной имеющейся информации о собственных свойствах (статических и динамических) ОУ и воздействиях на объект со стороны внешней среды, причем модель соответственна реально существующему объекту (процессу) в процессе работы и по всем оказываемым входным воздействиям. Под полнотой информации здесь имеется в виду не только знание возможных изменений динамических свойств объекта, но и знания о воздействиях, потому что эти изменения являются контролируемыми и могут быть измерены. В случае их неконтролируемости при определяющих допущениях, заранее известных границах изменений свойств объекта (неконтролируемых) и воздействий на него в комплексе существует возможность обеспечения пониженной (в пределе – нулевой) чувствительности к этим изменениям желаемых свойств системы управления.

Чаще всего эти изменения относят к малым отклонениям относительно расчетных свойств, задаваемых моделью типа «объект – внешняя среда».

В тех случае невозможности гарантировать минимальность неконтролируемых отклонений свойств объекта управления, обычные системы становятся неработоспособными – неспособными удовлетворять требуемым показателям качества. Тогда на основе дополнительно представленной информации о состоянии системы, которая получается от включенных в первоначальную структуру системы вычислителей, вносятся изменения в ее динамические свойства. При этом задача управления будет считаться решенной, если после коррекции система вновь удовлетворяет желаемым требованиям и свободна от неконтролируемых возмущений.

Далее адаптивными системами будем называть системы, в которых управление объектом осуществляется таким образом, чтобы через заранее определенное количество времени СУ стала нечувствительна к неконтролируемым изменениям свойств этого объекта (структуры связей, операторов и их параметров). Это нестрогое определение понятия адаптивных систем требует, естественно, уточнения в конкретном случае, когда четко сформулированы способ адаптации и условия физической реализации адаптивной системы [23].

5.3.1 История возникновения адаптивного управления

К началу 50-х гг. учеными всего мира были разработаны основные инженерные методы, служащие для расчета и построения систем автоматического регулирования.

									Лист
									59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

В эти же годы в индустриально развитых странах интенсивно стала интенсивно развиваться различная авиационная техника, все сильнее требовавшая развития своих автоматизированных бортовых систем наведения, навигации, управления. На тот момент оказалось, что разработанных приемов теории автоматического управления не хватает для того, чтобы обеспечивать требуемую динамическую точность работы бортовых систем управления летательными аппаратами. Причина этого состояла в нестационарности математических моделей ЛА, а изменялись во времени при изменении высот и скоростей полета. В широких диапазонах изменения динамических свойств объекта стационарный регулятор оказался не способен соответствовать требованиям по динамике заданной системы, а для нестационарного объекта требовался также нестационарный регулятор, т.е. регулятор, способный автоматически изменять свои параметры и структуру закона регулирования по мере изменения свойств объекта и входных воздействий на СУ так, чтобы динамические свойства всей СУ соответствовали заданным требованиям. Иначе говоря, СУ должна быть способной адаптироваться (приноравливаться) к изменяющимся условиям работы [37].

Для решения конкретных задач управления нестационарными объектами мало задачи, которая сформулирована в общих чертах. Это связано с тем, что адаптивное управление необходимо там, где отсутствует или существенно ограничены трансцендентальные сведения о реально существующих законах изменения динамических свойств объекта воздействия и входных воздействий на саму СУ, имеющие место при функционировании системы в режиме реального времени. Эти сведения необходимо получать в процессе работы СУ. Нелинейная нестационарная природа адаптивных систем, свойственная им по определению – еще одно обстоятельство, которое существенно усложняет развитие общей теории адаптивного управления [38].

Однако, вопреки затруднениям, необходимость управления ЛА заставляла решать эти сложные, но насущные, проблемы, благо, что в прочих областях промышленности (электротехнической, нефтедобывающей, металлургической и т.д.) проблемы управления нестационарными объектами все больше проявлялись. В таких крупных странах, как США и СССР, задачи адаптивного управления ЛА начинают решать серьезные научные центры и крупные аналитики. В 1959 году в США прошла конференция по адаптивному управлению ЛА. В СССР указанную тематику активно исследуют в таких крупных институтах и научно-исследовательских организациях как Военно-воздушная инженерная академия им. Н. Жуковского, НИИ автоматических систем и других организациях. В 1957 году в институте автоматики и телемеханики АН СССР начались исследования по разработке принципов построения и теории адаптивных систем управления для ракет, созданных в опытно-конструкторском бюро «Факел». Исследованиями руководил академик Б.Н. Петров. В 1960 году он же проводит в Москве рабочее совещание по адаптивным способам управления ЛА. В следующем году под редакцией сотрудников Политехнического института Бруклина (США) Э. Мишкина и Л. Брауна выходит монография по адаптивным системам управления «Приспосабливающиеся автоматические системы». В том же году академик А.А. Красовский выпустил монографию, где говорится о динамике непрерывных самонастраивающихся систем. В научном сообществе принято считать, что именно эти две работы сыграли главную роль не только в привлечении огромного числа специалистов к разработке теории, но и в практическом применении адаптивных СУ. После них появилось большое количество статей и монографий, основной темой которых является рассматриваемое в данной диссертации адаптивное управление.

						<i>Лист</i>
					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	61
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

И тем не менее в работе [130] автор А.А. Красовский говорит о том, что «...несмотря на полувековую историю развития, огромное число публикаций и научных форумов, проблема адаптивного регулятора не имеет практического решения на уровне современных требований». Де-факто, с одной стороны имеется в наличии достаточное количество примеров реализованных практически адаптивных автопилотов, с другой стороны объем практического внедрения адаптивных регуляторов не соизмерим с объемом вложенных ранее и вкладываемых в настоящее время усилий в теорию адаптивного управления. В своей работе [131] А.А. Красовский формулирует причину сложившегося противоречия: «Происходит рост числа ветвей теории управления, дифференциация без интеграции, теория без практики». В этой работе автор также свидетельствует о кризисном состоянии теории управления и направлений ее развития.

Термин «адаптивные системы» настолько широкий и неточный, что дискуссия по нему, зародившись еще в 50-х годах XX века, возобновлена и по сей день. В особенности полно полемика по данной теме отражена в работе [132]. Что касается отечественной литературы, то до 70-х годов пользовался термин «самонастраивающиеся системы», а после них популяризировалось название «адаптивные системы».

Известны инициативы по использованию адаптивных поисковых систем управления в авиации. Несмотря на это, главное практическое применение системы экстремального регулирования получили в других отраслях промышленности.

Так как показателей, которые бы определяли функциональную работоспособность СУ, много, следовательно, разумно ожидать, что и вариацией адаптивных систем появится много. За достаточно небольшой срок (1963-1973 гг.) в СССР вышли в свет многие монографии.

При этом искомые параметры регулятора оцениваются напрямую без идентификации модели объекта. Задача решается разными несколькими методами: вариантами градиентных и на основе метода наименьших квадратов. Различают нормированные и не нормированные подходы [34, 35]. В задачах с внешними возмущениями при прямой адаптации применяют робастные методы оценивания: нормирование сигналов, метод проекций и оценивание с зоной нечувствительности. В задачах с объектами, сильно меняющими свою динамику, используют многомодельное адаптивное управление с переключениями.

Непрямая адаптация является по сути объединением процедур идентификации параметров объекта и синтеза регулятора для него. Такой подход обеспечивает очень широкое разнообразие методов адаптации. Для идентификации используют как варианты указанных ранее методов (градиентные, наименьших квадратов), так и другие, например, частотные, метод инструментальных переменных, метод подпространств состояния. Вместо поиска параметров регулятора проводится идентификация модели объекта управления, по которой определяют регулятор. Для синтеза используются различные методы: варианты метода размещения полюсов с использованием оптимизационных схем (LQ-регуляторы) [34].

В [36] рассматриваются задачи адаптивного управления сложными динамическими объектами, которые имеют высокие порядки или являются нелинейными. Предлагаются различные варианты упрощения и анализа таких объектов (точечная линеаризация, пассивация и другие). Предлагаемые алгоритмы адаптивного управления развивают известные методы (метод скоростного градиента, неявной эталонной модели и ряд других).

В итоге, можно сделать вывод, что методы адаптивного управления дают широкий набор алгоритмов и подходов к решению ряда задач теории управления. У каждого подхода имеются свои преимущества и недостатки.

При прямой адаптации (адаптация с эталонной моделью), применяя варианты метода функций Ляпунова, строятся алгоритмы управления, гарантирующие устойчивость системы управления, однако они чувствительны к действию внешних возмущений. При их наличии присутствуют существенные ограничения на применимость эталонной модели.

При непрямо́й адаптации за счет отдельного выбора алгоритмов оценивания параметров системы и синтеза закона управления строятся схемы адаптивного управления, обеспечивающие качественное управление при различных видах внешних возмущений. Однако при этом возникает проблема сохранения устойчивости системы при изменении ее параметров, из-за чего приходится дополнительно усложнять алгоритм адаптации [25].

5.3.2 Адаптивные системы с эталонной моделью

Отказ от датчиков переменных механического движения ЭП, соединение ПЧ (и системы управления) с двигателем только силовым кабелем при векторном управлении АД вызывают потребность в косвенном определении ряда координат состояния. Это, прежде всего, частота вращения ротора и фаза ориентирующего (опорного) вектора – вектора потокосцеплений ротора – относительно неподвижного статора. Вычисление этих оценок реализуется на основе измеренных токов и напряжений статора двигателя с помощью специальных алгоритмов идентификации (идентификаторов).

Наибольшее распространение в практике АЭП получили идентификаторы, которые замкнуты по выходной координате. Например, это алгоритмы, которые созданы на основе адаптивных систем с задающей моделью (MRAS – model reference adaptive system) или наблюдателей полного порядка (НПП).

Исключая их, известны идентификаторы со структурой расширенных фильтров Кальмана, алгебраические вычислители, анализаторы спектров паразитных гармоник и др.

Идентификаторы типа MRAS состоят из двух частей, вычисляющие две оценки одной и той же (в общем случае – векторной) координаты состояния (например, вектор потокосцеплений ротора). Одна модель, которая не имеет неопределённого параметра, является задающей, а рассчитанная с её помощью переменная, считается эталоном. Другая модель, зависит от неопределённого параметра, является настраиваемой, вдобавок её адаптация происходит путём изменения оценки неопределённой переменной, которая подлежит идентификации. Считается, что истинное значение искомой переменной найдено только в том случае, если выходные координаты адаптивной и задающей модели совпадают.

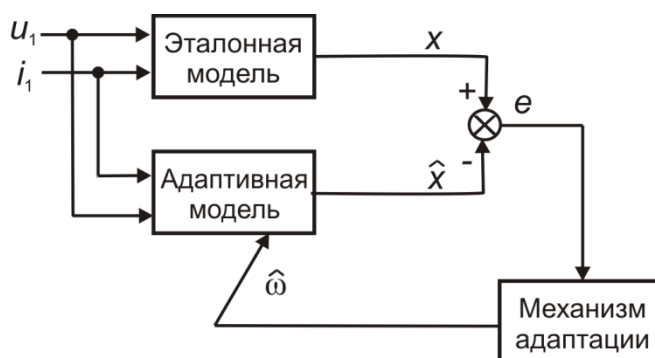


Рисунок 5.2 – Структура адаптивного наблюдателя с эталонной моделью (MRAS)

Механизм адаптации согласно рисунку 5.2 обрабатывает разностный сигнал (разность между фактическим и эталонным сигналами) и производит подстройку параметров регулятора. Выбор эталонной модели является частью процесса синтеза адаптивной системы управления.

Эталонная модель должна удовлетворять двум требованиям: с одной стороны, она должна отражать все требования к качеству синтезируемой системы, с другой стороны, эталонная реакция должна быть достижима для основного контура.

Последнее требование накладывает ограничения на структуру эталонной модели, определяемой предполагаемой структурой основного контура [31].

В зависимости от выбора выходных величин с эталонной x и адаптивной моделей \hat{x} , формирующих вектор ошибки e , возможны отличные системы MRAS. В качестве оценочных величин принято использовать вектор потокосцепления ротора или ЭДС вращения ротора.

MRAS по ЭДС вращения ротора более точен при работе на низких скоростях вращения по причине отсутствия элемента открытого интегрирования, в отличие от MRAS по потокосцеплению ротора, но он сложнее в реализации из-за эффекта нелинейности адаптационных коэффициентов усиления, а также из-за наличия высших гармоник в сигналах тока и напряжения статора.

Оценка метода MRAS. Адаптивный наблюдатель с эталонной моделью имеет относительно простую систему и требует меньше вычислительных ресурсов системы, чем наблюдатель, реализованный на основе фильтра Кальмана. Метод имеет максимальный диапазон регулирования скорости 1:100, а также показывает хорошие динамические характеристики до частоты 2 Гц [104].

MRAS годится для недорогих решений с невысокими требованиями по отношению к показателям качества управления [103]. Точность описанных выше методов уменьшается с уменьшением скорости вращения. Характеристики этого метода находятся в зависимости от того, как точно параметры модели соответствуют параметрам реально используемой машины, что особенно чувствительно на низких скоростях вращения, когда ошибки в параметрах достаточно сильно влияют на качество работы в установившемся режиме, а также на динамические характеристики.

5.3.3 Адаптивные наблюдатели полного порядка

Адаптивный наблюдатель полного порядка (АНПП) по отношению к АД – это наблюдатель состояния АД, выстроенный на основе решения полной системы уравнений электрического равновесия для статора и на основании доступных сведений о напряжениях и токах статора. Он способен к трансформации самого себя в соответствии с модификацией окружающих условий или изменением параметров внутренних связей системы.

В наблюдателе полного порядка (НПП) порядок наблюдателя равен порядку наблюдаемой системы. Иначе говоря, НПП восстанавливает все составляющие вектора состояния системы.

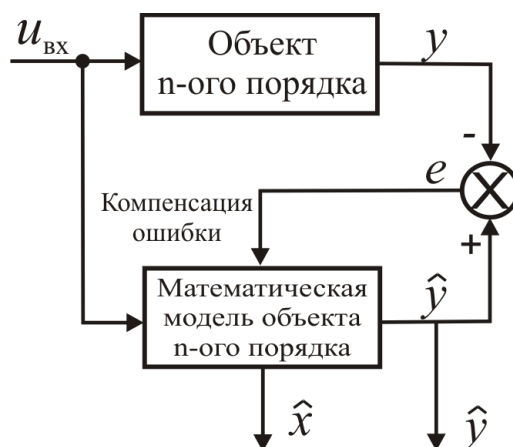


Рисунок 5.3 – Общая схема НПП,

где $u_{вх}$ – входное воздействие на объект

Впервые структура этого наблюдателя была предложена в работах [42, 46]. Однако в первоначальном виде АНПП оказался неработоспособен в генераторных (тормозных) режимах работы электропривода. Впоследствии была опубликована статья [47], уже учитывающая генераторные режимы работы [43].

Структура АНПП представлена на рисунке 5.4. В ней можно выделить следующие основные блоки: НПП – непосредственно наблюдатель полного порядка; ФП – функциональный преобразователь.

Заметим, что максимально достижимая скорость адаптации, определяемая коэффициентом передачи И-регулятора, в двигательных режимах работы электропривода более чем на порядок выше, чем в генераторных.

Кроме того, существует необходимость изменения знака коэффициента передачи И-регулятора при пересечении рабочей точкой электропривода некоторой линии переключения (ЛП), которая происходит во втором и четвертом квадрантах плоскости механических характеристик (на рисунке 5.4 разделяет области 3 и 4). Наличие этой линии объясняется разными знаками производной модуля вектора токов статора по оценке активного сопротивления статора для установившегося режима НПП. Нахождению рабочей точки на ЛП соответствует режим, при котором угол между векторами токов и напряжений статора равен 90 градусов. В окрестности ЛП также существуют области (затемненные на рисунке 5.4 области 2 и 3), где идентификатор может оказаться неработоспособным вследствие неблагоприятного взаимного влияния ошибок ИЧВР и ИАСС. В области 2 влияние подсистем идентификатора таково, что система, как правило, оказывается устойчивой. Выяснить же точные границы области неработоспособности системы внутри области 3 нецелесообразно, так как реально она будет более широкой из-за неизбежных погрешностей в определении остальных параметров схемы замещения АД, и «замораживать» текущее значение сопротивления придется «с запасом», отступая от ее теоретических границ. Величина этого «запаса» должна устанавливаться в каждом конкретном случае при настройке электропривода [43].

На рисунке 5.6 представлена структурная схема варианта расширенного НПП.

									Лист
									70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

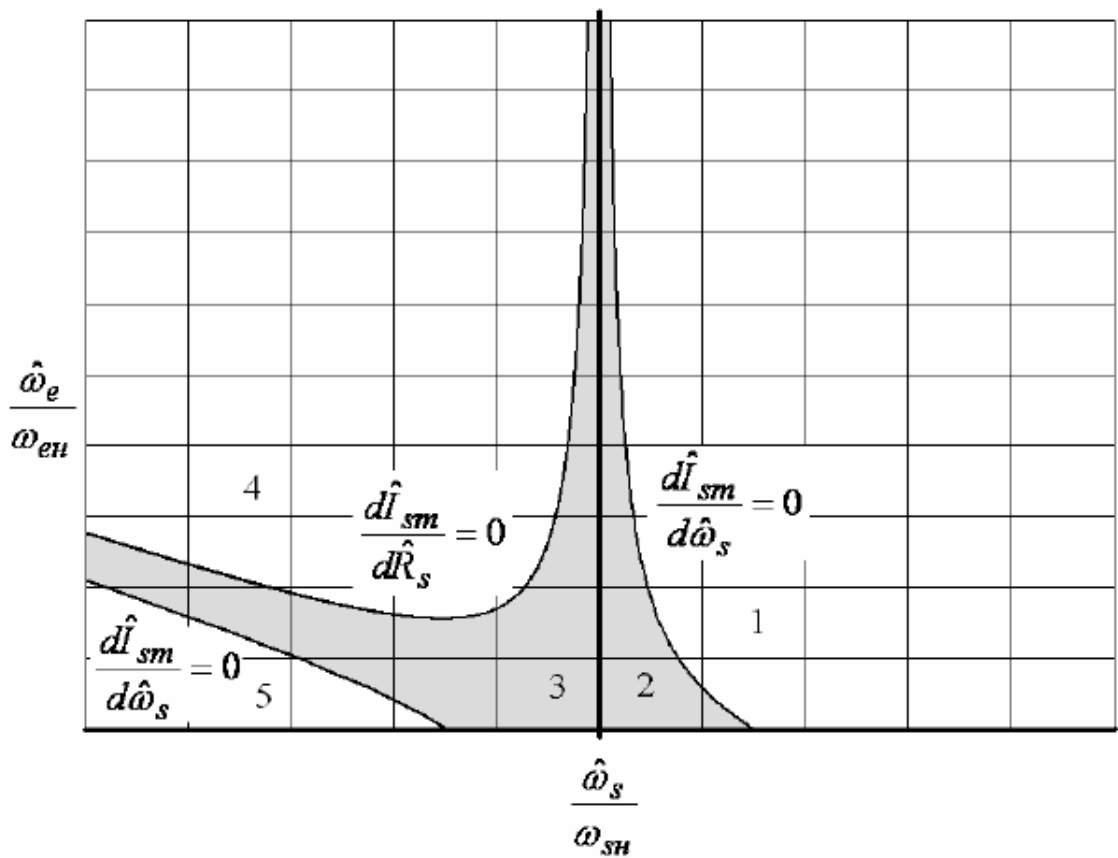


Рисунок 5.5 – Механические характеристики для АНПП

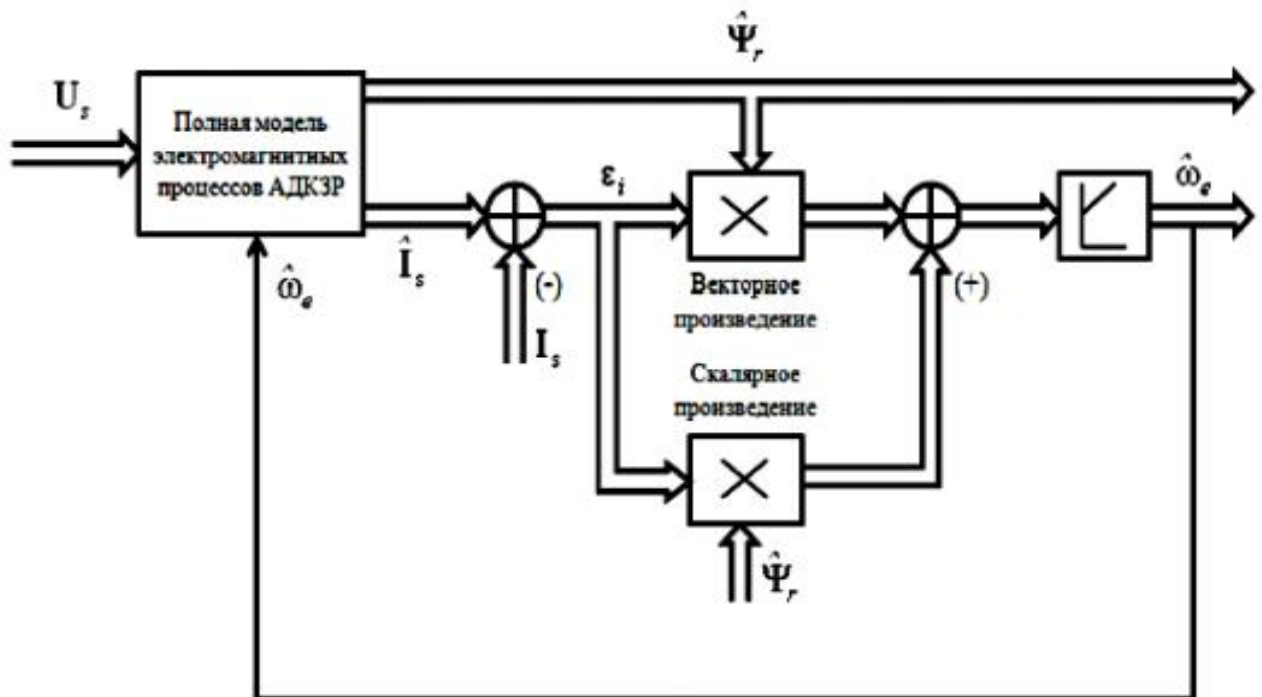


Рисунок 5.6 – Структурная схема наблюдателя частоты вращения, построенного по принципу НПП

Недостатки используемого алгоритма достаточно очевидны – дрейф параметров схемы замещения АД, которые оказывают существенное влияние на качество расчета скорости, а также на устойчивость всей системы в целом, а также все помехи и смещения (могут существовать в сигнале датчика тока) непременно скажутся на качестве текущих оценок частоты вращения и вектора потокосцепления ротора [45].

В бездатчиковых системах асинхронного электропривода нет другой возможности, кроме как воспроизведения посредством АНПП оценки вектора токов статора, являющейся единственной векторной координатой состояния, которая может быть измерена на выходных клеммах ПЧ.

Различные механизмы адаптации (наблюдатели замкнутого цикла), измеряющие параметры математической модели в зависимости от изменения параметров объекта, используют с целью увеличения точности оценок и уменьшения чувствительности наблюдателя к изменениям параметров объекта.

Особенность наблюдателей типа АНПП – это способность дать точные результаты оценки частоты вращения, повышение устойчивости системы к изменению параметров даже на очень низких частотах вращения вне зависимости от возникающих ошибок идентификации [45].

Оценка метода АНПП. АНПП более точен, чем MRAS даже при низких скоростях вращения (близких к нулю). Также рассматриваемый метод наблюдателя менее чувствителен к изменению параметров двигателя и к воздействию шумов, тем не менее, он способен обеспечить удовлетворительную точность вычисления потокосцепления и скорости, но только в при использовании в ограниченном диапазоне частот. Это связано с известной проблемой введения начальных условий при очень низких частотах (близких к нулевой). Адаптивный наблюдатель полного порядка требует больших вычислительных ресурсов.

В АНПП присутствует запаздывание в процессе формирования электромагнитного момента, который связан с большим объемом вычислений. АНПП применимы в ЭП с прямым управлением моментом (DTC).

5.3.4 Адаптивные наблюдатели пониженного порядка (наблюдатель Люенбергера)

В адаптивном наблюдателе пониженного порядка уменьшается размерность наблюдателя на основании того, что часть вектора состояния возможно рассчитать на основании результатов непосредственного измерения выходного сигнала [40, 105]. Наблюдатель Люенбергера или наблюдатель пониженного порядка – это редуцированное наблюдающее устройство, которое имеет порядок меньший, чем порядок системы на количество непосредственно измеряемых компонент. Этот наблюдатель порядка формирует такой вектор состояния системы, учитывающий только те составляющие вектора, недостижимые для прямого измерения. Особенности формирования такого наблюдателя приведены в [40, 105].

Наблюдатель Люенбергера состоит из структуры, схожей со структурой фильтра Кальмана. Несмотря на это, в наблюдателе Кальмана матрица коэффициентов обратной связи складывается из параметров ОУ и характеристик помех (ковариантными матрицами помех Q и R). В это же время, матрица L в наблюдателе Люенбергера задает темпы сходимости, т.е. является проектировщиком, который обеспечивает желаемую динамику процесса наблюдения [106].

Образец реализации наблюдателя пониженного порядка для распознавания скорости вращения и потокосцепления ротора АД приведен в [107, 108].

Наблюдатель пониженного порядка проще в практической реализации из-за того, что имеет пониженную размерность наблюдателя [105], но в то же время чувствителен к шумам в диагностировании параметров объекта [40, 105]. Вследствие этого наблюдатель пониженного порядка применим в системах с незначительными помехами или без помех.

									Лист
									74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

5.4 РАСШИРЕННЫЙ ФИЛЬТР КАЛЬМАНА

5.4.1 История возникновения фильтра Кальмана

Существует широкий диапазон литературы, где обсуждаются исторические аспекты развития и становления теории фильтрации [60, 61]. Несомненно тот факт, что среди зарубежных работ следует выделить обзор Т. Кайлатца – крупнейшего известного ученого в области фильтрации [62], чей обзор включает в себя 390 наименований. Причем в отличие от многих работ, издаваемых за рубежом, его обзор достаточно объективно отражает вклад отечественных и зарубежных ученых в теорию фильтрации.

Первый публичный доклад, где изложены идеи решения задачи винеровской фильтрации с помощью алгоритма, получившего впоследствии название фильтра Кальмана, состоялся 1 апреля 1959 г. в Кливленде [133] опубликована в 1960 г. в Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers – Американское общество инженеров механиков) [63]. Особенность этой первой работы – отсутствие составляющей ошибки (белого шума) в рассматриваемой задаче оценивания одной последовательности на фоне другой. Фактически, это была задача, решаемая Колмогоровым и Винером. При доказательстве полученных результатов была использована известная в основном лишь ученым-математикам теорема об ортогональной проекции. И несмотря на то, что традиционно предполагался гауссовский характер оцениваемых последовательностей, то из предложенных в ней результатов следовало то, что предложенный алгоритм, удовлетворимый при гауссовском характере ошибок измерения и возмущающих шумов, сохраняет свою приемлемость и при произвольном их распределении в классе линейных систем. Об этом, весьма важном свойстве нередко забывают, в то время как именно оно и определяет эффективность использования фильтра Кальмана при решении прикладных задач.

										Лист
										75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

Значительное внимание уделялось разнообразным вариациям фильтров Кальмана, адаптивным алгоритмам, решению нелинейных задач [61-68]. Стал широко применяться обобщенный ФК, называвшийся в ранних публикациях фильтром Калмана – Шмидта [64]. Далее предложены итерационные фильтры и фильтры более высокого порядка, представлявшие собой различные модификации алгоритмов кальмановского типа [61, 67]. Для решения нелинейных задач с существенными нелинейностями активно разрабатывались алгоритмы, основанные на применении рекуррентных соотношений для апостериорной плотности. Здесь получили развитие такие алгоритмы как метод точечных масс, метод, основанный на полигауссовской аппроксимации апостериорной плотности, метод разделения, метод Монте-Карло и ряд других [69, 70-73].

Суммируя вышесказанное, можно указать две основных тенденции, в которых алгоритмы фильтрации получили наибольшее применение. Одно из них связано с разработкой радиотехнических радионавигационных систем. Особенность этого направления заключалась в рассмотрении в основном задачи для непрерывного времени.

Другое направление связано с навигацией, наведением и траекторным слежением. Здесь наравне с задачами в непрерывном времени почти сразу стали исследоваться их дискретные варианты. Следует отметить, что в сборнике, посвященном 60-летию Кальмана [66], именно навигационные задачи рассматривались в разделе, касающемся приложений.

К началу 80-х годов стал заметен относительный спад интереса к разработке алгоритмов фильтрации. Дальнейший толчок в их развитии наблюдается уже в 90-е годы. В особенности это связано с потребностями в решении более сложных задач навигации относительно к подвижным объектам нетрадиционного типа. К ним следует отнести роботы, автомобили, различного рода автономные подвижные объекты. Также это связано с существенным прогрессом в развитии вычислительных средств.

В настоящее время в разработках новых алгоритмов фильтрации различают два основных направления [74].

Одно из них связано с алгоритмами кальмановской структуры, таких как регрессионные фильтры, сигма-поинт фильтры, так называемые UKF-фильтры (Unscented Kalman Filter) [75]. Все они основаны на довольно простой идее замены процедуры вычисления производных при получении линейного представления на процедуры, которые близки к процедуре статистической линеаризации. Идеино эти алгоритмы вытекают из задачи построения линейных приемлемых алгоритмов для нелинейных, негауссовских систем. Следует отметить, что решение задачи получения линейного оптимального алгоритма в линейной задаче для негауссовского случая сводится в обычному фильтру Кальмана. Об этом в сущности говорится в работе [63]. Но в нелинейной задаче при реализации этого типа алгоритмов требуется численное нахождение интегралов, которые бы определяли бы вторые моменты для измерений, а также взаимные моменты для измерений и оцениваемой последовательности. При оценивании случайных процессов рекуррентно эту процедуру можно получить только путем подмены описания апостериорной плотности на каждом шаге с помощью двух моментов. Разнообразные модификации сводятся к разнообразным путям упрощения вычисления интегралов, которые требуется отыскивать при нахождении линейного представления. Поэтому стоит отметить, что процедура статистической линеаризации предлагалась и ранее, в частности, она описана в книге [76], где цитируются первые работы, связанные с разработкой этого приема. В то время не принимался к сведению факт наличия дополнительной ошибки при смене нелинейной функции на ее линейным аналогом.

Другое направление также связано с созданием алгоритмов нелинейной фильтрации.

									Лист
									78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

В случае, когда на практике приходится иметь дело со стационарными задачами, неоспоримое достоинство частотного подхода заключается в его наглядности и возможности в некоторых ситуациях «на пальцах» проиграть различные варианты и комбинации без привязки к результатам, выдаваемым компьютером. Следует отметить, что развитие алгоритмов фильтрации, предназначенных для решения стационарных задач, продолжается и в настоящее время, в том числе и в плане использования отличного от среднеквадратичного критерия качества [80].

5.4.2 Описание фильтра Кальмана

Фильтр Кальмана – это линейный адаптивный фильтр рекурсивного типа, позволяющий получать информацию о параметрах и переменных состояния АД на основании измерительной информации в условиях действия на двигатель случайных помех и возмущений. Термин «рекурсивный» обозначает то, что для расчета текущих оценок требуется знание о состоянии системы только на предыдущем шаге [50, 58].

									Лист
									80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

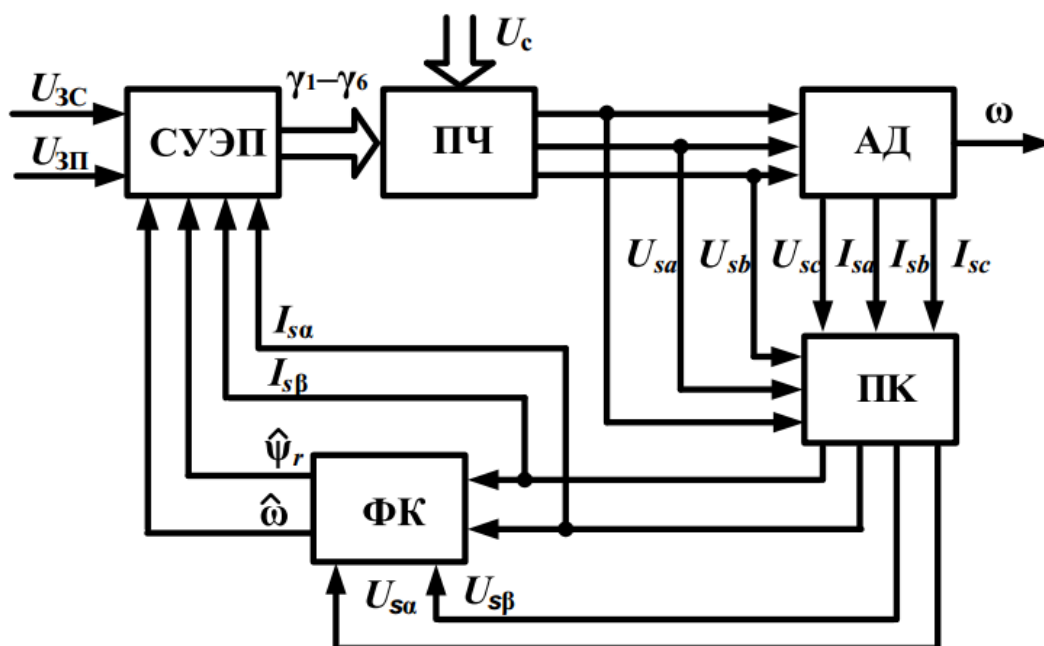


Рисунок 5.7 – Структура бездатчикового векторного асинхронного электропривода, замкнутого по сигналу идентификатора состояния на основе фильтра Кальмана

На рисунке 5.7 представлена структура бездатчикового векторного асинхронного ЭП, замкнутого по сигналу идентификатора состояния на основе фильтра Кальмана. Измеряемые статорные напряжения U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} и токи I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} асинхронного двигателя АД трансформируются преобразователем координат (ПК) в напряжения $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ и токи $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ неподвижной системы координат α - β , которые являются входными сигналами для фильтра Кальмана (ФК). ФК на основе измеренных статорных напряжений и токов асинхронного двигателя АД рассчитывает текущие значения потокосцепления ротора $\hat{\psi}_r$ и скорости $\hat{\omega}$ вала двигателя. На систему управления электроприводом (СУЭП), включающую в себя ПИ-регуляторы скорости, потокосцепления ротора и токов статора, подаются сигналы задания на скорость U_{3c} и потокосцепления ротора $U_{3п}$. Также система управления электроприводом СУЭП получает сигналы статорных токов $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ и рассчитанных с использованием фильтра Кальмана потокосцепления ротора $\hat{\psi}_r$ и скорости $\hat{\omega}$ вала двигателя.

В составе системы управления электроприводом СУЭП предусмотрено преобразование статорных токов из неподвижной системы координат α - β во вращающуюся d-q, ориентированную по вектору потокосцепления ротора. Применение данного преобразования определено тем, что регуляторы координат ЭП могут быть реализованы только во вращающейся системе координат. На ПЧ поступают управляющие сигналы для шести силовых полупроводниковых ключей $\gamma_1 - \gamma_6$ от СУЭП, а также трехфазное напряжение питающей сети U_c .

Как было сказано выше, для расчета текущих оценок требуется знать состояние системы только на предыдущем шаге. Каждый шаг работы фильтра Кальмана подразделяется на два этапа. Первый – предсказания состояний динамического объекта и измеряемой величины на основании полученной информации о состоянии. Под предсказанием следует понимать оценивание переменных по предварительным данным о состоянии объекта на предыдущем шаге работы фильтра. Второй этап состоит в уточнении предсказанного значения. На этот раз с использованием данных текущих измерений (с датчиков токов или напряжений) [58].

Для использования кальмановской фильтрации необходимо знание адекватной математической модели АД, которая должна быть представлена в пространстве состояний, а также ковариационных матриц погрешностей измерения и возмущения. Математическая модель АД является линеаризованной в окрестности предыдущей рабочей точки. При этом действующие на двигатель помехи должны представлять собой белый гауссовский шум.

Примечание. Белый гауссовский шум (аддитивный) – вид мешающего воздействия в канале передачи информации. Характеризуется равномерной, то есть одинаковой на всех частотах спектральной плотностью мощности, нормально распределенными временными значениями и аддитивным способом воздействия на сигнал.

Наиболее распространенный вид шума, используемый для расчета и моделирования систем радиосвязи. Термин «аддитивный» означает, что данный вид шума суммируется с полезным сигналом и статически не зависит от сигнала [59].

Низкая робастность при изменении внутренних параметров двигателя (активных сопротивлений и индуктивностей обмоток, момента инерции) – одна из главных проблем бездатчикового электропривода. Для сообразной оценки вектора состояния фильтром Кальмана необходимо знание точных значений параметров двигателя. Это связано с тем, что его параметры забиваются в программу идентификатора (фильтр Кальмана технически реализуется в виде программного кода на каком-либо языке программирования в микроконтроллере). При несоответствии заданных и реальных параметров произойдет неточное оценивание переменных состояния ЭД, что может привести к некачественному регулированию процессов в ЭП или даже к потере устойчивости системы [58].

Так как в фильтре Кальмана текущее значение зависит от предыдущего линейно, то данный наблюдатель хорошо подходит для линейных систем. Другим недостатком наблюдателей на основе фильтра Кальмана является высокая требовательность к вычислительным мощностям, особенно для режима реального времени.

Бездатчиковые системы векторного управления асинхронным электроприводом с наблюдателем на основе фильтра Кальмана чувствительны к изменению параметров электродвигателя и зашумленности сигналов, получаемых с датчиков тока и напряжения [50].

Оценка метода фильтра Кальмана. Структура фильтра Кальмана обладает минимальной чувствительностью к случайному изменению параметров двигателя и к наличию шумов в измеряемых сигналах [109]. Минимальная скорость, на которой может работать расширенный ФК, почти равна нулю.

Расширенный фильтр Кальмана имеет сложную структуру и вычисления, и, следовательно, наличие запаздывания в формировании момента [100]. Также рассматриваемый метод предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам системы, что увеличивает стоимость ЭП по причине потребности в использовании мощного процессор и большого объема памяти. Фильтр Кальмана ухудшает динамические свойства системы [110]. Употребим для систем, требующих повышенной точности оценки, которая не зависит от вариации параметров объекта наблюдения и измерительных шумов.

									Лист
									84
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>				

5.5 НАБЛЮДАТЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СКОЛЬЗЯЩИЕ РЕЖИМЫ

Скользкий наблюдатель – это нелинейный наблюдатель с преднамеренным введением скользящих режимов.

Достигнуть желаемых свойств наблюдателя, в том числе индифферентности (нечувствительности) к разбросу параметров в системах с неизменяемыми возмущениями можно за счет преднамеренного введения скользящих режимов, т.е. режимов движения по поверхностям разрыва вектора состояния или их пересечениям [111]. Этот вид движения применяется в релейных системах и в системах с переменной структурой [112].

В общем случае при разработке СН структура модели наблюдателя меняется таким образом, что рассматриваемые как совместная система модель и объект всегда выходят на скользящие режимы, во время которых процессы в объекте и модели протекают одинаково. Из-за того, что близки системы уравнений, описывающие модель и систему, и их выходные величины совпадают, то по средним значениям разрывных компенсирующих коэффициентов модели в скользящем режиме можно судить о неизвестных параметрах объекта.

В наблюдателях состояния со скользящим режимом порядок наблюдателя снижается на единицу, когда система переходит в скользящий режим. Такая особенность заключается в следующем: только после того, как ошибка оценивания одного состояния доходит до нуля за конечное время, другие ошибки восстановления экспоненциально стремятся к нулю. Описанный Дракуновым [113] наблюдатель со скользящим режимом для нелинейных систем был построен так, что доводил координаты ошибки оценивания до нуля за конечное время (сколь угодно малое время).

Продуктивность и быстродействие наблюдателя (рис. 1.6) можно увеличить, используя компенсатор ошибки, работающий в скользящем режиме, предложенный Sangwongwanich и Doki [99]. На рис. 5.8 показана динамическая структура скользящего компенсатора ошибки, которая согласовывается с моделью двигателя так же, как и компенсатор ошибки в АНПП (рис. 1.6). В скользящем компенсаторе ошибка по току Δi_1 используется для определения скользящей гиперплоскости, т.е. всей совокупности состояний на границе разрыва, обеспечивающих заданные показатели качества. По мгновенным значениям ошибки по току формируются разрывные коэффициенты $G_1(\hat{\omega})$ и $G_2(\hat{\omega})$ и компенсируются параметры моделей статора и ротора двигателя, в то время как по среднему значению Δi_1 с помощью алгоритма идентификации формируется оценка скорости.

Величина ошибки по току уменьшается до нуля за счет регулятора релейного типа, работающего в скользящем режиме, т.е. в режиме высокочастотных переключений [109].

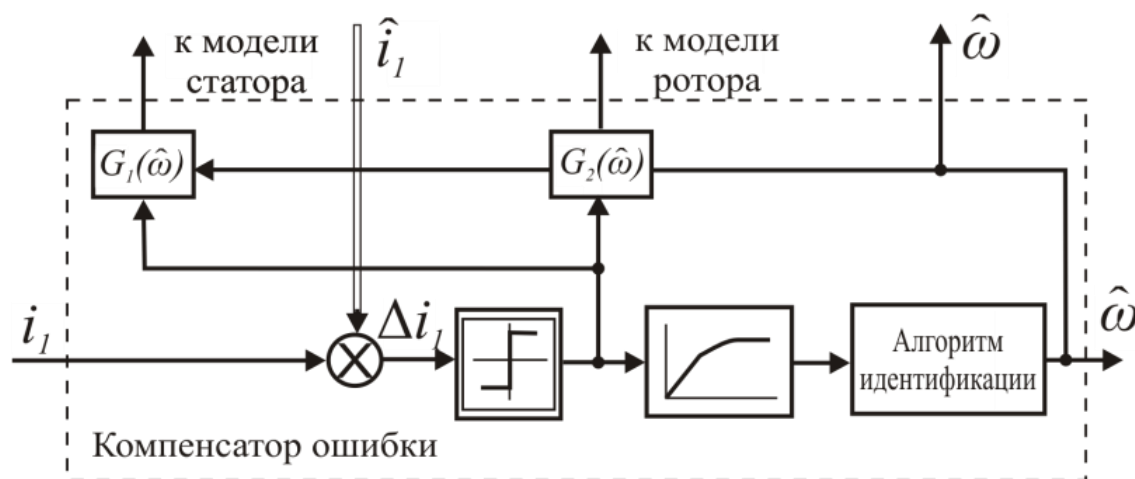


Рисунок 5.8 – Динамическая структура скользящего компенсатора ошибки

Оценка метода скользящих наблюдателей. Метод, описанный в [99], уменьшает ошибку оценки потокосцепления ротора при изменяемых параметрах двигателя. Практическая реализация скользящего наблюдателя требует быстродействующего процессора. Минимальная скорость, на которой может работать скользящий наблюдатель, составляет 53 об/мин [99], $0,03 \omega_{0H}$ [100]. Метод синтеза скользящего наблюдателя приведен, например, в работах Вишневого В.И. [100].

В скользящем наблюдателе увеличено быстродействие по сравнению с АНПП, ошибки оценки потокосцепления и скорости ротора при изменяемых параметрах АД практически равны нулю [99]. Скользящий наблюдатель способен доводить динамическую ошибку оценивания координаты до нуля за конечное время, точнее чем MRAS даже при скоростях вращения близких к нулю. Устойчив к шумам в измерениях подобно фильтру Кальмана, обеспечивает устойчивую работу ЭП в широком диапазоне регулирования скорости и инвариантность к параметрическому возмущению.

						Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.6 НЕЙРОННЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ

5.6.1 История возникновения нейронных наблюдателей

Искусственный интеллект, состоящий из нейронных сети, имеет долгую историю, сравнимую с историей всего человечества, поскольку людей всегда интересовал вопрос – как происходит процесс их мышления? Значимость этого вопроса определялась тем, что именно процесс мышления позволял понимать окружающий мир и управлять им.

Исторически впервые вопросы, связанные с процессами мышления, начали исследовать такие философы как Аристотель, Раймунд Луллий, Томас Гобс, Рене Декарт и другие.

Философия сформулировала преимущественно важные положения, управляющие рациональной частью мышления, однако для их официализации необходимы были фундаментальные исследования в другой науке – математике. На протяжении нескольких столетий эти исследования проводились параллельно, взаимно обогащая обе науки. Логика, вычисления и вероятность оказали наибольшее влияние на развитие ИИ.

Главными направлениями исследований тогда являлись:

- формальные правила формирования правильных заключений;
- определение пределов вычислимости;
- проведение рассуждения с использованием недостоверной информации.

Еще одним разделом математики, внесшим существенный вклад в развитие ИИ, является теория вероятности.

Несмотря на относительно длительный период исследований природы мышления, практических результатов было достигнуто мало. Во многом связано это было связано с неэффективными методами научных исследований, которые позволили получить значительные результаты в таких естественнонаучных областях, как астрономия, физика и химия. [91].

									Лист
									88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

Значительный прорыв произошел в 20 веке. Он был связан, во первых, с интеграцией достижений различных наук в новейшую область науки - искусственный интеллект, а, во-вторых, с достижениями в области нейрофизиологии, нейроанатомии и психологии.

В 60-е годы XX вв. группа исследователей в областях нейробиологии и нейроанатомии установила, что мозг - это сотни миллиардов нейронов соединенных друг с другом [92].

Полученное понимание функционирования нейрона и его связей предоставило возможность исследователям создать математические модели, явившиеся теоретическим базисом для разработки ИНС.

Первые ИНС были реализованы в виде электронных схем. Впоследствии, ИНС стали реализовываться в виде программ, что связано с развитием вычислительной техники.

Искусственные нейронные сети (ИНС) - математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей - сетей нервных клеток живого организма [93].

В современном развитии нейронных сетей можно выделить несколько этапов.

1 этап. Состоит в прорыве в области нейроинтеллекта. С этим этапом связаны несколько дат.

В середине Второй мировой войны (1943 г.) напечатана статья У. Маккалока и У. Питтса, посвященная нервной активности. В ней авторы формулируют понятие нейронной сети и представляют модель нейронной сети на электрических схемах.

Далее в Н. Винер издает работу о кибернетике (1948 г.). На следующий год Д. Хебб представляет первый алгоритм обучения. В 1958 г. Джон фон Нейман предложил имитацию простых функций нейронов с использованием вакуумных трубок, Ф. Розенблатт создал однослойный перцептрон.

Перцептрон (от лат. *Perceptio* - восприятие) - математическая и компьютерная модель восприятия информации мозгом (кибернетическая модель мозга), предложенная Ф. Розенблаттом в 1957 г. и реализованная в виде электронной машины «Марк-1» в 1960 году. Перцептрон стал одной из первых моделей нейросетей, а «Марк-1» - первым в мире нейрокомпьютером. Несмотря на свою простоту, перцептрон способен обучаться и решать довольно сложные задачи [95].

2 этап ученые окрестили «пессимизмом». Это связано с рядом причин. Во-первых, сети оказались неспособны решать задачи, внешне весьма сходные с теми, которые они успешно решали. Во-вторых, предложенные однослойные сети оказались теоретически неспособными к решению многих самых простых задач. Например, реализовать функцию «исключающее ИЛИ». В-третьих, опубликованная исследователем М.Минским статья формально доказывает ограниченность перцептрона, и как следствие его неспособность решать достаточно широкий круг задач.

Все это вместе взятое приводит к снижению интереса многих исследователей к нейронным сетям.

Третий этап в современном развитии нейронных сетей ученые и историки называют оптимистичным. Благодаря исследованию таких ученых, как Кохонен, Гроссберг, Андерсон, сформировался теоретический фундамент, на основе которого стало возможно конструирование мощных многослойных сетей. Однако проблема заключалась в их обучении.

В 1974 году Вербосом разработан алгоритм обратного распространения ошибки для обучения многослойных перцептронов, открытый заново в 1982 г. Д. Паркером и в 1986 году Дэвидом И. Румельхартом, Дж. Е. Хинтоном и Рональдом Дж. Вильямсом и независимо и одновременно С.И. Барцевым и В.А. Охониным (Красноярская группа) [94]. Этот систематический метод для обучения многослойных сетей преодолевает ограничения, указанные Минским.

									Лист
									90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Дальнейшие исследования показали, что несмотря на многие успешные практические результаты этот метод не является универсальным. Проблема заключается в очень долгом процессе обучения, а в некоторых случаях сеть может вообще не обучиться. Последнее возможно по двум причинам: паралич сети и попадание в локальный минимум.

Следующей проблемой искусственных нейронных сетей оказалась проблема стабильности-пластичности. Ее суть - обучение новому образу уничтожает или изменяет результаты предыдущего обучения.

В конце 80-х гг. Гроссберг создал адаптивную резонансную теорию (АРТ) и модели нейронных сетей, построенных на ее основе [94].

Сети и алгоритмы АРТ сохраняют пластичность, которая является столь необходимой для изучения новых образов, однако в то же время, предупреждая изменение ранее запомненных образов.

В 2000-х годах проблема попадания в локальный минимум была решена, например, применением стохастических методов обучения (Больцмановское обучение, обучение Коши).

На настоящий момент разработано достаточно большое количество других моделей нейронных сетей, имеющих свои особенности.

Существующие сейчас СУ можно систематизировать так:

1) Классическая система управления. Разработана на основе ТАУ с разнообразными математическими методами, применяемыми для обработки данных;

2) Система управления, структура которой разработана на основе нечеткой логики и экспертных систем;

3) Системы управления на основе ИНС и генетических алгоритмов.

Достоинствами метода рассматриваемого нейросетевого управления являются:

- эффективность в условиях шумов;
- отсутствие ограничения на линейность системы;

– по окончании обучения обеспечивается управление в режиме реального времени;

Нейросетевые системы управления последнее время все чаще доказывают свою адаптивность к реальным условиям.

Несмотря на это при использовании нейронных сетей возникают сложности, которые связаны с надежностью их работы – ИНС могут быть недостаточно точными даже при их неправильном функционировании. Таким образом, для критических задач использование ИНС необходимо поддерживать другими системами.

Суммируя вышесказанное, будущее интеллектуального управления лежит в сочетании традиционного управления с потенциальными возможностями систем, основанных на использовании ИНС [91].

5.6.2 Описание нейронных наблюдателей

Одним из современных направлений в идентификации является использование искусственных нейронных сетей (ИНС), созданных на основе компьютерной модели [86, 87].

Что такое ИНС? В самом простом случае – подобно сети нервных клеток, упорядоченную по слоям совокупность элементов, называемых нейронами (см. рисунок 5.10) [88].

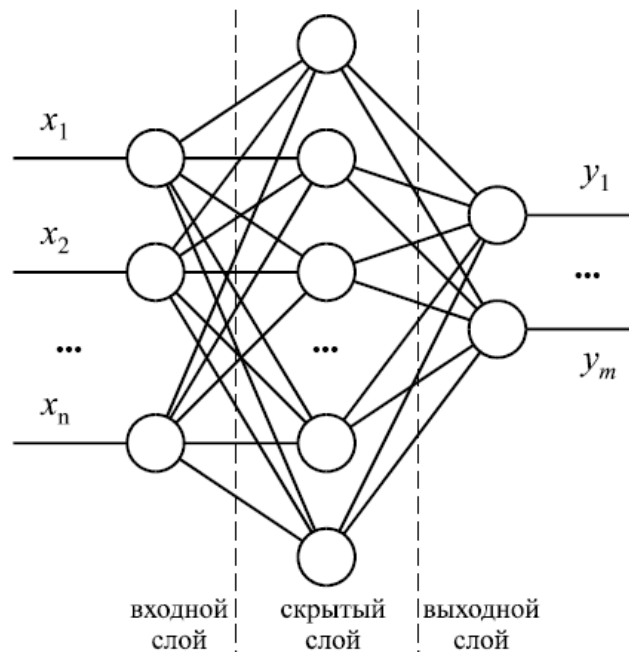


Рисунок 5.9 – Схема трехслойной ИНС

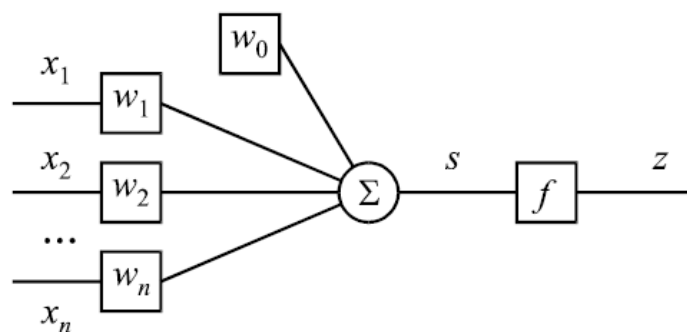


Рисунок 5.10 – Модель нейрона

ИНС складывается из соединенных в строго определенном порядке искусственных нейронов. Нейроны из разных слоев соединяются между собой связями в таком порядке, чтобы каждый нейрон из последующего слоя получал сигналы от всех нейронов предыдущего слоя.

Каждый нейрон описывается уравнением

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i + b; \quad z = f(s)$$

Сигналы, поступающие на вход каждого нейрона (рисунок 5.8) суммируются в S , где b – сдвиг (смещение), x_i - массив выходных данных, w_i - вес i -той связи. Далее они преобразуются в выходной сигнал нейрона в соответствии с выбранной активационной функцией z . Чаще всего при решении задач управления активационная функция нейронов входного и выходного слоев являются линейной, а нейронов скрытого слоя – нелинейной. Таким образом, выходной слой ИНС воспринимает вектор входных сигналов $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и формирует сигнал $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ на нейронах скрытого слоя. Вектор выходов нейронной сети $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ снимается с выходного слоя.

При работе с сетью различают обучение и работу - два принципиально различных режима. При работе в режиме обучения нейронной сети на ее вход подается некоторый тренировочный вектор входных сигналов, а значения весов связей w_i и сдвигов b нейронов скрытого и выходного слоев изменяются до тех пор, пока сеть не научится преобразовывать некоторый набор N тренировочных выходных векторов в набор желаемых выходных. Для оценивания качества работы сети обычно используется сумма квадратов ошибок E по выходам ИНС для всех тренировочных сигналов:

$$E = \sum_{j=1}^N \|d_j - y_j\|^2 \quad (5.1)$$

где норма $\| \quad \|$ - евклидова, d_j, y_j – j -е значение вектора желаемых и фактических выходов сети, соответственно.

Если получится так настроить сеть, чтобы величина E не превышала некоторую величину синхронно для всех множеств входных сигналов, процесс обучения считают законченным, после чего параметры сети фиксируют, а саму сеть считают готовой к работе.

Вследствие обучения ИНС приобретает способность разграничивать не только тренировочные сигналы, предъявленные в процессе обучения, но также и хорошо справляться с любыми другими предполагаемыми подаваемыми сигналами, различая и группируя их по совокупностям признаков.

Рассмотрим нейросетевые технологии в управлении.

На рисунке 5.11 приведена схема использования НК для управления объектом по командам $U_3(k)$ в дискретные моменты времени [89].

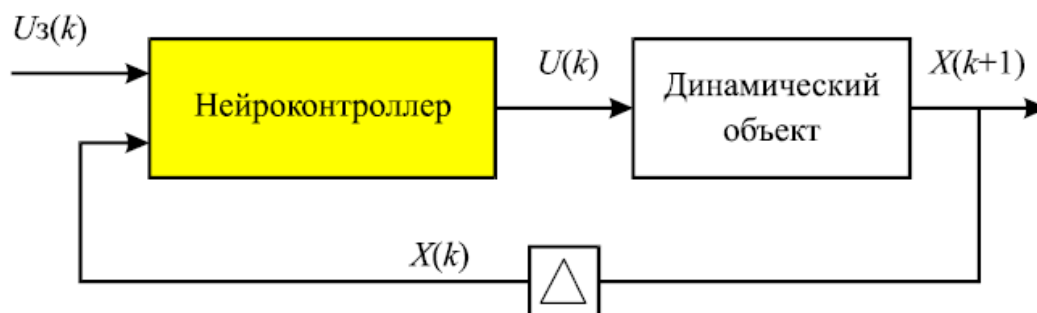


Рисунок 5.11 – Управление объектом при помощи нейроконтроллера

А обучение самого НК напрямую по входным и выходным данным объекта может быть произведено с помощью схем, которые представлены на рисунке 5.12.

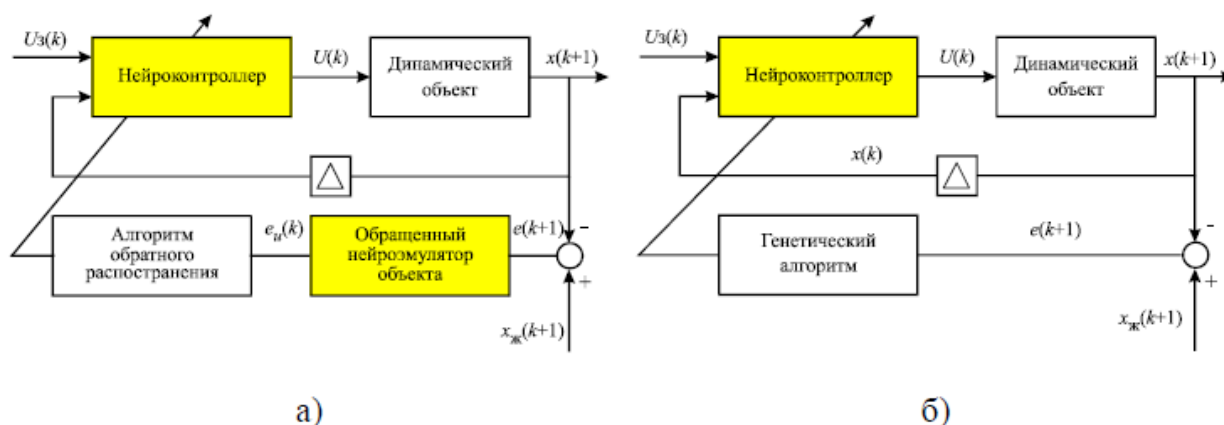


Рисунок 5.12 – Схемы обучения нейроконтроллера: а) обучение нейроконтроллера при помощи алгоритма обратного распространения ошибки; б) применение генетического алгоритма для оптимизации параметров нейроконтроллера

Цель происходящего обучения – придание НК способности формировать последовательность управляющих сигналов $U(k)$, которые бы переводили объект из свободного начального состояния в заданное конечное за конечное число шагов (ходов). Алгоритм обратного продвижения ошибки вполне годится для этой цели, однако не годится, так как требует сведений об ошибке на выходном слое ИНС.

Для получения таких сведений в схеме на рисунке 5.10,а предусмотрен обращенный нейроэмулятор объекта, с помощью которого выделяется равнозначная ошибка, которая соответствует ошибке на выходе объекта. Иначе говоря, его роль сводится к трансформации ошибки на выходе объекта в выходной сигнал на выходе НК. После однократного обучения НК вся процедура повторяется для произвольно выбранного начального состояния до тех пор, пока параметры сети не сконцентрируются к значениям, соответствующим любым начальным условиям.

Одним из недостатков алгоритма обратного распространения ошибки заключается в том, что по своей сути он – локальная оптимизирующая процедура. Вместе с этим, используемая для оценки качества ИНС ошибка вычисляемая по (5.1), является, по причине достаточно большого количества определяемых параметров сети, многоэкстремальной функцией параметров сети, то для нахождения ее минимума требуется глобальный метод. Вот почему последнее время все большее внимание для тренировки ИНС уделяется использованию генетических алгоритмов (ГА) – это эффективный метод глобальной оптимизации, перенимающий у природы механизмы перераспределения генетической информации, которая обеспечивает адаптационные изменения внутри популяции. Сочетание таких вычислительных технологий как ИНС и ГА, рассматривается сегодня как допустимый источник будущего развития в области эволюционного моделирования.

Помимо свойственной ему глобальности, ГА, как тренировочная процедура, обладает достоинством по сравнению с алгоритмом обратного распространения ошибки – способностью тренировать НК сразу по выходным параметрам объекта, как это показано на рисунке 5.12,б [88, 90].

Оценка метода нейронных наблюдателей. Нейроэмулятор (нейронный наблюдатель) обладает слабой восприимчивостью к отклонению параметров объекта за счет возможности само- и принудительного стороннего обучения. Параллельная работа совокупности простых вычислительных устройств дает высокое быстродействие. Нейроэмулятор требует высоких вычислительных мощностей, а это, как следствие, ведет к удорожанию системы. Из-за высоких требований к вычислительным мощностям не подходит для использования в массовых электроприводах.

									Лист
									97
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

5.7 СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОТОРА И ВЫБОР МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для того чтобы выбрать метод косвенной оценки для применения в системе управления ЭП, составим сравнительную оценку описанных методов.

Сравнение произведем по следующим параметрам:

- Структура;
- Требования к вычислительным ресурсам;
- Чувствительность к шумам в измерениях;
- Чувствительность к изменению параметров двигателя;
- Быстродействие;
- Точность;
- Отношение $\omega_{\min} / \omega_{\text{OH}}$;
- В каких системах в основном применяется.

Сравнительная оценка представлена в таблице 5.2.

Для устойчивой работы конструкции подъемника, обеспечения повышенной точности позиционирования груза и удовлетворения требований к ЭП выберем метод адаптивного наблюдателя с эталонной моделью (MRAS).

Таблица 5.2 – Сравнительная оценка методов косвенной оценки оставляющих углового перемещения ротора

Метод	Структура	Требования к вычислительным ресурсам	Чувствительность к шумам в измерениях	Чувствительность к изменению параметров двигателя	Быстродействие	Точность	$\omega_{мин}$ фон	Применяется в основном для систем
Системы, вычисляющие угловое положение ротора и скорость его вращения по моделям двигателя на основе информации о токах и напряжениях статора								
1.1 MRAS	простая	низкие	высокая	высокая	высокое	средняя	0,06	ПЧ-АД
1.2 АНПП	сложная	высокие	средняя	низкая	среднее	высокая	0,02	
1.3 Наблюдатель Люенбергера	сложная	средние	высокая	высокая	среднее	средняя	0,03	
1.4 Расширенный фильтр Кальмана	сложная	высокие	низкая	низкая	низкое	высокая	0,015	
1.5 Скользящие наблюдатели	сложная	средние	низкая	средняя	высокое	средняя	0,03	
1.6 Нейронные наблюдатели	сложная	высокие	низкая	низкая	высокое	высокая	0,02	
Системы, вычисляющие угловое положение ротора и скорость его вращения на основе статической функциональной зависимости								
2.1 По полному сопротивлению двигателя	простая	низкие	высокая	высокая	высокое	низкая	0,1	ТПН-АД
2.2 По углу нагрузки	простая	низкие	высокая	высокая	высокое	низкая	0,1	
2.3 По ЭДС, наводимой в статоре полем ротора	средняя	средние	средняя	средняя	высокое	средняя	0,06	

5.8 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MRAS В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Как было сказано в п.5.3.2, идентификаторы типа АНЭМ (MRAS) содержат в своей архитектуре две модели, которые вычисляют две оценки одной и той же (в общем случае – векторной) переменной состояния, например вектора потокосцеплений ротора. Одна модель - задающая, не содержит неопределённого параметра, а вычисленная с её помощью переменная, считается эталоном. Другая модель - настраиваемая, зависит от неопределённого параметра, вдобавок её адаптация происходит путём изменения оценки неопределённой переменной, подлежащей вычислению.

Рассмотрим процедуру синтеза адаптивного наблюдателя MRAS со сравнением потока.

Поток ротора можно определить как по модели статора, так и по модели ротора. В модели статора для этого нужно знать ток и напряжение статора, а в модели ротора – ток статора и скорость ротора.

На этом предположении основана идея построения адаптивного наблюдателя, позволяющего вычислить оценки потока и скорости ротора.

Структура этого наблюдателя приведена на рисунке 5.13.

Будем условно считать, что модель статора является эталонной, то есть вычисляемый в ней поток является истинным, совпадающим с потоком двигателя. Модель ротора при этом является адаптируемой по потоку под модель статора.

Адаптация модели ротора осуществляется регулирующим адаптером. Он сравнивает потоки моделей и вырабатывает с помощью регулятора сигнал оценки скорости $\hat{\omega}_{eR}$, который является адаптирующим.

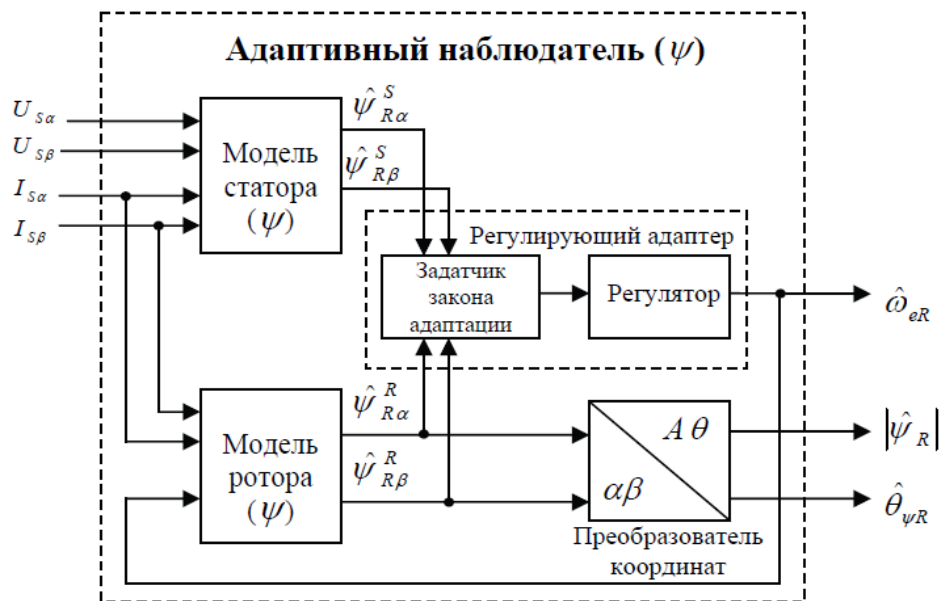


Рисунок 5.13 – Структура адаптивного наблюдателя MRAS [127]

Функцию преобразования сравниваемых векторных величин (в данном случае – потоков) в скалярный сигнал оценки скорости на выходе регулятора называют законом адаптации.

Для удобства дальнейшего использования вычисляемый в модели ротора поток ротора можно преобразовать из декартовой неподвижной системы координат в полярную. Это преобразование осуществляется с помощью следующих формул:

$$|\hat{\psi}_R| = \sqrt{(\hat{\psi}_{R\alpha}^R)^2 + (\hat{\psi}_{R\beta}^R)^2} - \text{оценка модуля потока ротора};$$

$$\hat{\theta}_{\psi R} = \arctg \frac{\hat{\psi}_{R\beta}^R}{\hat{\psi}_{R\alpha}^R} - \text{оценка угла потока ротора.}$$

Попробуем определить закон адаптации исходя из условия устойчивости наблюдателя.

Реальные магнитные процессы в роторе двигателя описываются следующим уравнением:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + a_{r21} \vec{I}_S$$

Назовем матрицу A матрицей объекта. Коэффициенты этой матрицы зависят от параметров замещения схемы двигателя и реальной скорости ротора $\omega_R = \omega_{eR}/Z_p$.

Соответственно выражение модели ротора будет выглядеть так:

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A} \hat{x} + a_{r21} \vec{I}_S$$

где \hat{x} – оценка потока ротора, \hat{A} – оценка матрицы объекта.

Если считать параметры схемы замещения двигателя постоянными и известными, то уравнение модели ротора отличается от уравнения, описывающего ротор, только тем, что в нем вместо реальной скорости ω_{eR} используется ее оценка $\hat{\omega}_{eR}$.

То есть матрицы \hat{A} и A будут отличаться только теми коэффициентами, которые зависят от скорости (или оценки скорости) [127].

Теперь запишем уравнение ошибки потока модели ротора. Для этого введем следующие обозначения:

- Ошибка потока модели ротора:

$$e = x - \hat{x} = \begin{pmatrix} \psi_{R\alpha} \\ \psi_{R\beta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\psi}_{R\alpha}^R \\ \hat{\psi}_{R\beta}^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\psi_{R\alpha} \\ \Delta\psi_{R\beta} \end{pmatrix}$$

Так как было оговорено считать модель статора эталонной, то можно записать:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{R\alpha} = \hat{\psi}_{R\alpha}^S - \hat{\psi}_{R\alpha}^R \\ \Delta\psi_{R\beta} = \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \end{cases} \quad (5.2)$$

- Матрица ошибки объекта:

$$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} a_{r22} & -\hat{a}_{i22} \\ \hat{a}_{i22} & a_{r22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{r22} & -a_{i22} \\ a_{i22} & a_{r22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\omega_{eR} \\ \Delta\omega_{eR} & 0 \end{pmatrix}$$

где $\Delta\omega_{eR} = \hat{\omega}_{eR} - \omega_{eR}$.

Вычитая из уравнения, описывающего ротор двигателя, уравнение, описывающее модель ротора, получим:

$$\frac{d}{dt} x - \frac{d}{dt} \hat{x} = Ax - \hat{A} \hat{x}$$

Подставив это уравнение: $\mathbf{x} = \mathbf{e} + \hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{A}} = \Delta\mathbf{A} + \mathbf{A}$, имеем уравнение, описывающее отклонение наблюдателя:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{e} - \Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$$

Для того, чтобы полностью описать рассматриваемый наблюдатель (рисунок 5.13) в отклонениях, к этому уравнению надо добавит уравнение, описывающее неизвестный пока закон адаптации:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{e} - \Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \\ \frac{d\Delta\omega_{eR}}{dt} = F(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (5.3)$$

Здесь $F(\mathbf{e})$ - неизвестная функция, определяющая закон адаптации.

Можно предположить, что при разных видах функции $F(\mathbf{e})$ система (5.3) может описывать устойчивый или неустойчивый процесс.

Очевидно, что для нормальной работы наблюдателя описываемый этой системой процесс должен оставаться устойчивым. Попробуем оценить его устойчивость, пользуясь функцией Ляпунова.

Исходя из описанного выше, для многомерного уравнения описываемого системой (5.3), попробуем рассмотреть в качестве функции-кандидата в функции Ляпунова следующую функцию:

$$V = \mathbf{e}^T\mathbf{e} + \frac{(\hat{\omega}_{eR} - \omega_{eR})^2}{\lambda} = \mathbf{e}^T\mathbf{e} + \frac{\Delta\omega_{eR}^2}{\lambda}$$

где λ – положительное число.

Так как

$$\frac{\Delta\omega_{eR}^2}{\lambda} > 0 \text{ и } \mathbf{e}^T\mathbf{e} = \Delta\psi_{R\alpha}^2 + \Delta\psi_{R\beta}^2 > 0,$$

Функция V является положительно определенной, как и положено функции Ляпунова.

Теперь найдем производную функции-кандидата:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V &= \frac{d}{dt} \left(\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{\Delta\omega_{eR}^2}{\lambda} \right) = \frac{d}{dt} (\mathbf{e}^T \mathbf{e}) + \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta\omega_{eR}^2}{\lambda} \right) = \\ &= \left(\frac{d}{dt} \mathbf{e}^T \right) \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \frac{d}{dt} \mathbf{e} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\delta(\hat{\omega}_{eR} - \omega_{eR})^2}{\delta\hat{\omega}_{eR}} \frac{d\hat{\omega}_{eR}}{dt} + \frac{\delta(\hat{\omega}_{eR} - \omega_{eR})^2}{\delta\omega_{eR}} \frac{d\omega_{eR}}{dt} \right) \end{aligned}$$

Будем считать, что адаптация осуществляется существенно быстрее, чем меняется частота вращения ротора. Тогда ω_{eR} можно считать условно-постоянной, а производную $d\omega_{eR}/dt$ равной нулю. В этом случае полученное выражение для производной функции-кандидата переписывается как:

$$\frac{d}{dt}V = \left(\frac{d}{dt} \mathbf{e}^T \right) \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \frac{d}{dt} \mathbf{e} + \frac{2\Delta\omega_{eR}}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR}$$

Преобразовав это уравнение с учетом первого уравнения системы (5.3), имеем:

$$\frac{d}{dt}V = (\mathbf{A}\mathbf{e} - \Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}})^T \mathbf{e} + \mathbf{e}^T (\mathbf{A}\mathbf{e} - \Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}) + \frac{2\Delta\omega_{eR}}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR}$$

Сделав дальнейшие матричные преобразования, заменив коэффициенты матриц их значениями и воспользовавшись выражением (5.2), получим:

$$\frac{d}{dt}V = S_1 + S_2$$

Где

$$S_1 = -\frac{2L_R}{R_R} (\Delta\psi_{R\alpha}^2 + \Delta\psi_{R\beta}^2)$$

$$S_2 = -2\Delta\omega_{eR} (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) + \frac{2\Delta\omega_{eR}}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}$$

Попробуем теперь проанализировать знак dV/dt .

Очевидно, что S_1 всегда отрицательно. Следовательно, для обеспечения отрицательности производной функции V достаточно обеспечить равенство нулю величины S_2 .

Запишем это условие:

$$S_2 = -2\Delta\omega_{eR} (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) + \frac{2\Delta\omega_{eR}}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR} = 0$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Отсюда:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR} - (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) = 0 \quad (5.4)$$

При уже принятом допущении, что адаптация осуществляется существенно быстрее, чем меняется частота двигателя, выражение (5.4) можно переписать так:

$$\frac{d\Delta\omega_{eR}}{dt} = \lambda(\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) = F(\Delta\psi_{R\alpha}, \Delta\psi_{R\beta})$$

То есть получено не что иное, как закон адаптации системы (5.3).

Перепишем выражение (5.4) несколько по-другому:

$$\omega_{eR} = \lambda \int (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) dt$$

Этот закон можно обеспечить, если в регулирующем адаптере использовать И-регулятор, а лучше – более быстрый ПИ-регулятор.

В операторном виде, для ПИ-регулятора, закон адаптации будет выглядеть так:

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) \quad (5.5)$$

Здесь: K_p и K_i - коэффициенты усиления и интегрирования регулятора.

То есть регулирующий адаптер представляет собой пропорционально-интегрирующее звено с передаточной функцией: $W(p) = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right)$, на вход которого надо подать сигнал: $\Delta\psi_R = \hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S$.

Таким образом, можно констатировать, что функция V есть функция Ляпунова адаптивного наблюдателя, а выражение (5.5) есть закон адаптации, гарантирующий его устойчивую работу.

Влияние на устойчивость наблюдателя модели статора, являющейся эталонной, сомнений не вызывает, так как это просто апериодическое звено. Таким образом, для нормальной работы наблюдателя, изображенного на рисунке 5.13, остается только подобрать коэффициенты K_p и K_i .

Для более точной работы электропривода эти параметры целесообразнее настраивать на работающем приводе, нежели рассчитывать.

Важно сказать несколько слов о сигнале $\Delta\psi_R$, подающемся на вход регулятора регулирующего адаптера.

Если вспомнить, что для векторов \vec{A} и \vec{B} в прямоугольной системе координат $\alpha\beta$:

$$\vec{A} \times \vec{B} = A_\alpha B_\beta - A_\beta B_\alpha,$$

То становится ясно, что $\Delta\psi_R$ - это не что иное, как векторное произведение векторов $\vec{\psi}_R^R$ и $\vec{\psi}_R^S$. Геометрически величина векторного произведения двух векторов равна двойной площади треугольника между ними. Понятно, что поддерживая эту площадь равной нулю, регулятор будет стремиться сместить вектор потока модели ротора с вектором потока модели статора.

Знак векторного произведения зависит от угла между векторами. При реализации наблюдателя надо очень внимательно отнестись к этому знаку и обеспечить именно отрицательную обратную связь в регулирующем адаптере.

В некоторых литературных источниках можно встретить другой закон адаптации, отличный от (5.5), который выглядит так:

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \sqrt{(\hat{\psi}_{R\alpha}^S - \hat{\psi}_{R\alpha}^R)^2 + (\hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R)^2}$$

Логически он также понятен. В этом случае $\Delta\psi_R$ представляет собой модуль вектора разницы потоков моделей ротора и статора. Предположительно, этот закон предлагается авторами, которые не заботятся об устойчивости наблюдателя.

При его использовании, ПИ-регулятор адаптера стремится сделать модуль вектора ошибки нулевым. Однако при этом возникают неприятности:

- знак $\Delta\psi_R$ надо оценивать дополнительно;
- устойчивость системы не гарантируется.

Также для более плавного регулирования скорости в ручном режиме выберем джойстик МТВ2-РА22 фирмы «MeyerTec» 2 двумя фиксированными положениями, рассчитанный на работу с номинальными параметрами 3 А и 24 В [128].

										Лист
										107
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ

5.9 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MRAS В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Как было сказано ранее, в стабилизаторах одностоечного подъемника необходимо введение системы, способной автоматически, без участия человека, выставить стабилизаторы, выравнить подъемник по горизонту и контролировать его равновесие. Для автоматического обеспечения этих функций выбраны адаптивный наблюдатель с эталонной моделью и двухстепенной гироскоп. Составим структурную схему необходимой системы.

Пусть трехстепенной гироскоп описывается уравнениями:

$$\begin{cases} A\dot{\Omega} = -H\dot{\beta} + u; \\ B\ddot{\beta} = H\Omega \end{cases} \quad (5.1)$$

Предполагая, что входной u и выходной β сигналы (u – момент, развиваемый двигателем стабилизации, β – угол прецессии) доступны измерению, синтезируем адаптивное наблюдающее устройство, предназначенное для оценки вектора состояния и параметров гироскопа.

Передаточная функция гироскопа, найденная из уравнения (5.1), имеет вид

$$\frac{\beta}{u} = \frac{\frac{H}{AB}}{s^3 + \frac{H^2}{AB}s} \quad (5.2)$$

Разделив числитель и знаменатель на полином

$$(s + \lambda_2)(s + \lambda_3) = s^2 + (\lambda_2 + \lambda_3)s + \lambda_2\lambda_3$$

приводим эту функцию к канонической форме:

$$\frac{\beta}{u} = \frac{b_2 \frac{1}{s+\lambda_2} + b_3 \frac{1}{s+\lambda_3}}{s - a_1 - a_2 \frac{1}{s+\lambda_2} - a_3 \frac{1}{s+\lambda_3}} \quad (5.3)$$

где

$$b_2 = \frac{H}{AB(\lambda_2 - \lambda_3)}, \quad b_3 = \frac{H}{AB(\lambda_2 - \lambda_3)} = -b_2; \quad (5.4)$$

$$a_1 = \lambda_2 + \lambda_3; \quad a_2 = \frac{\lambda_2(H^2 + AB\lambda_2^2)}{AB(\lambda_3 - \lambda_2)}, \quad a_3 = \frac{\lambda_2(H^2 + AB\lambda_3^2)}{AB(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

Найдем сначала параметры регулятора. Объект (гироскоп теперь надо описывать уравнениями)

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 1 \\ a_2 & -\lambda_2 & 0 \\ a_3 & 0 & -\lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} u; \quad (5.5)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0]x. \quad (5.6)$$

Как и исходный объект (5.1) (при записи его уравнений переменных состояния), объект (5.5) полностью управляем и наблюдаем.

Рассматривая вектор состояния x как выход, а скалярный сигнал u как вход объекта, по уравнению (5.5) составим матричную передаточную функцию объекта

$$W(s) = (sI - A)^{-1}b = \frac{g(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^3 + [-\lambda_2^2 - \lambda_2\lambda_3 - \lambda_3^2 - a_2 - a_3]s} \times \\ \times \begin{bmatrix} b_2(\lambda_3 - \lambda_2) \\ b_2s^2 - \lambda_2b_2s - b_2(\lambda_3^2 + \lambda_2\lambda_3 + a_2 + a_3) \\ -b_2s^2 + \lambda_3b_2s + b_2(\lambda_2^2 + \lambda_2\lambda_3 + a_2 + a_3) \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Характеристическое уравнение замкнутого гиросtabilизатора

$$F(s) + pg(s) = 0$$

где $p = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]$ - матрица регулятора.

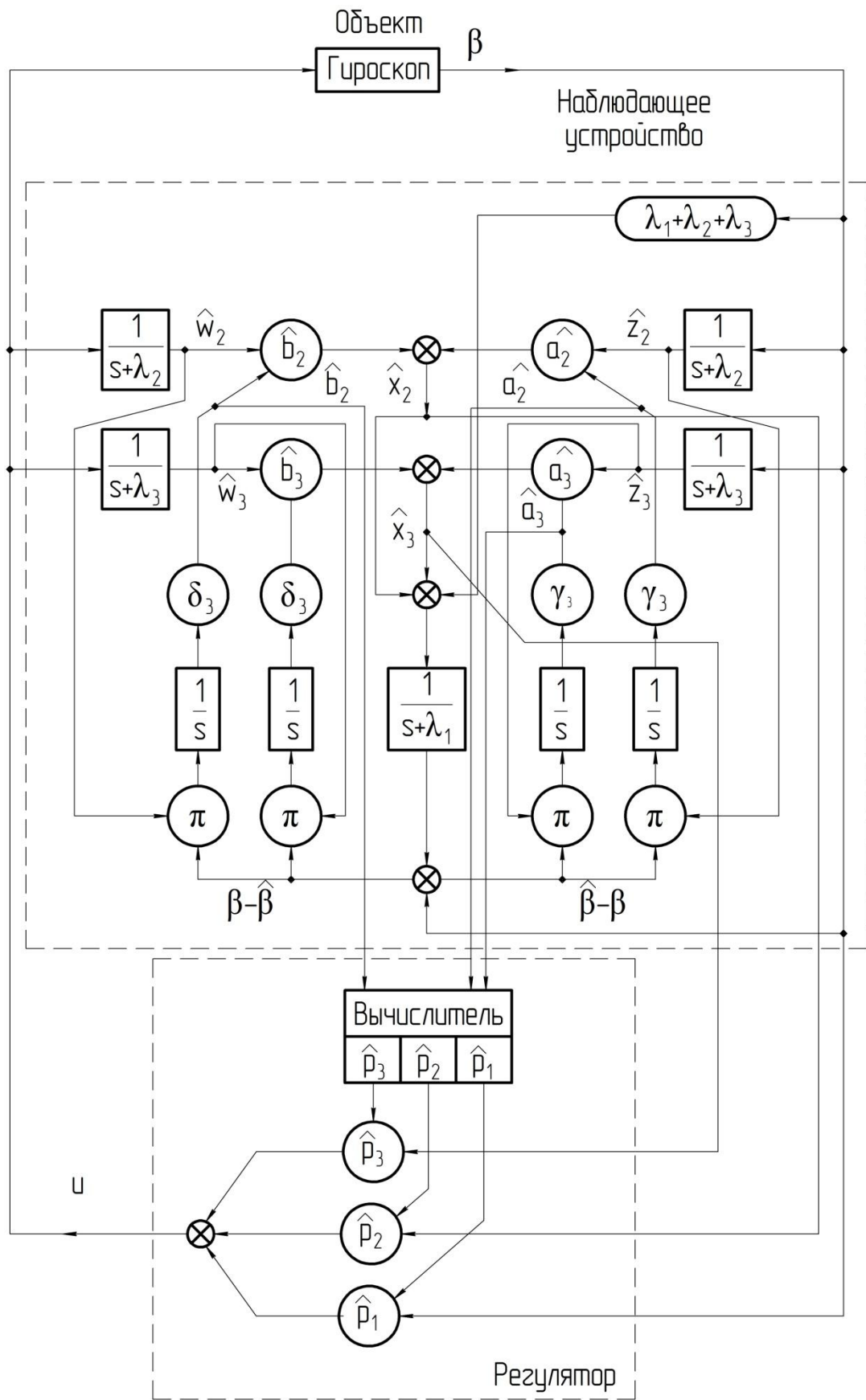


Рисунок 5.14 – Система «объект (гироскоп) – адаптивное наблюдающее устройство – регулятор»

Принимая для замкнутого гиросtabilизатора в качестве желаемой биномиальную стандартную форму $H(s) = (s + \omega_0)^3$ находим

$$pg(s) = H(s) - F(s) \quad (5.8)$$

Подставляя в (5.8) развернутые выражения p и $H(s)$ и в выражения $g(s)$ и $F(s)$, взятые из (5.7), после приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях s получим систему алгебраических уравнений

$$b_2 p_2 - b_2 p_3 = 3\omega_0;$$

$$-\lambda_2 b_2 p_2 + \lambda_3 b_2 p_3 = 3\omega_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2 + a_2 + a_3;$$

$$b_3(\lambda_3 - \lambda_2)p_1 - b_2(\lambda_3^2 + \lambda_2 \lambda_3 + a_2 + a_3)p_2 + b_2(\lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + a_2 + a_3)p_3 = \omega_0^3.$$

Решая эту систему, находим следующие выражения параметров настройки регулятора

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{\omega_0^3 + (\lambda_2 + \lambda_3)(3\omega_0 + \lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2 + a_2 + a_3) + 3\omega_0[(\lambda_2 + \lambda_3)^2 + a_2 + a_3]}{b_2(\lambda_3 - \lambda_2)} \\ p_2 &= \frac{3\omega_0 \lambda_3 + 3\omega_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2 + a_2 + a_3}{b_2(\lambda_3 - \lambda_2)} \\ p_3 &= \frac{3\omega_0 \lambda_2 + 3\omega_0^2 + \lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2 + a_2 + a_3}{b_2(\lambda_3 - \lambda_2)} \end{aligned} \right\}$$

Входящие в эти выражения $\lambda_2, \lambda_3, \omega_0$ известны. Что касается параметров объекта a_2, a_3, b_2 , то они, как сигналы x_2, x_3 , должны поступать от адаптивного наблюдающего устройства. Таким образом, уравнение регулятора имеет вид

$$u = \hat{p}_1 \beta + \hat{p}_2 \hat{x}_2 + \hat{p}_3 \hat{x}_3 \quad (5.9)$$

где $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3$ определяются выражениями (5.9) при замене a_2, a_3, b_2 оценками $\hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{b}_2$, снимаемыми с наблюдающего устройства.

Общая схема замкнутой системы «гироскоп – адаптивное наблюдающее устройство – регулятор» показана на рисунке 5.13.

Изменение параметров гироскопа не приводит к изменению апериодического протекания переходных процессов, обеспечиваемого выбранной стандартной формой $H(s) = (s + \omega_0)^3$, так что замкнутую систему можно рассматривать как самонастраивающуюся (адаптирующуюся) на заданное протекание переходного процесса.

Реализация адаптивного наблюдающего устройства и регулятора возможна как в аналоговом, так и в дискретном вариантах. В последнем случае система может обслуживать несколько гиросtabilизаторов [40].

									Лист
									112
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

5.10 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ НА ПРЕДМЕТ ПОДОБНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

В результате поиска, произведенного в таких базах данных как Web of Science, SciVal, E-Library и т.д., а также сети Интернет, и анализа научно-технической литературы на наличие аналога модернизируемой системы одностоечного подъемника было выявлено очень малое количество публикаций, содержащих его описание и работу. Публикаций об автоматизированных одностоечных подъемниках, где бы использовался бездатчиковый электропривод, не существует.

Повторный поиск среди других видов грузоподъемных механизмов выявил наличие тенденции использования бездатчикового электропривода в автоматизированных кранах и лифтах, что отражено в работах Панкратова В.В. и Виноградова А. Например, в работе [96] рассмотрены проблемы построения бездатчиковых систем электроприводов переменного тока, соответствующих современным требованиям для кранов и лифтов. Предложены способы существенного улучшения их характеристик.

В частности, составлена структурная схема синхронного бездатчикового электропривода, где в основу синтеза системы векторного управления приводом положены уравнения Парка-Горева для синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). В разработанной системе с помощью специализированных программно-аппаратных опций учтены требования к ПЧ и ЭП именно для грузоподъемных механизмов – использованы:

- S-образный задатчик интенсивности;
- функция управления тормозом и контактором двигателя;
- функции аварийного завершения работы;
- функции автонастройки без вращения двигателя;
- расширенные интерфейсные функции;

– функция рекуперации энергии в питающую сеть.

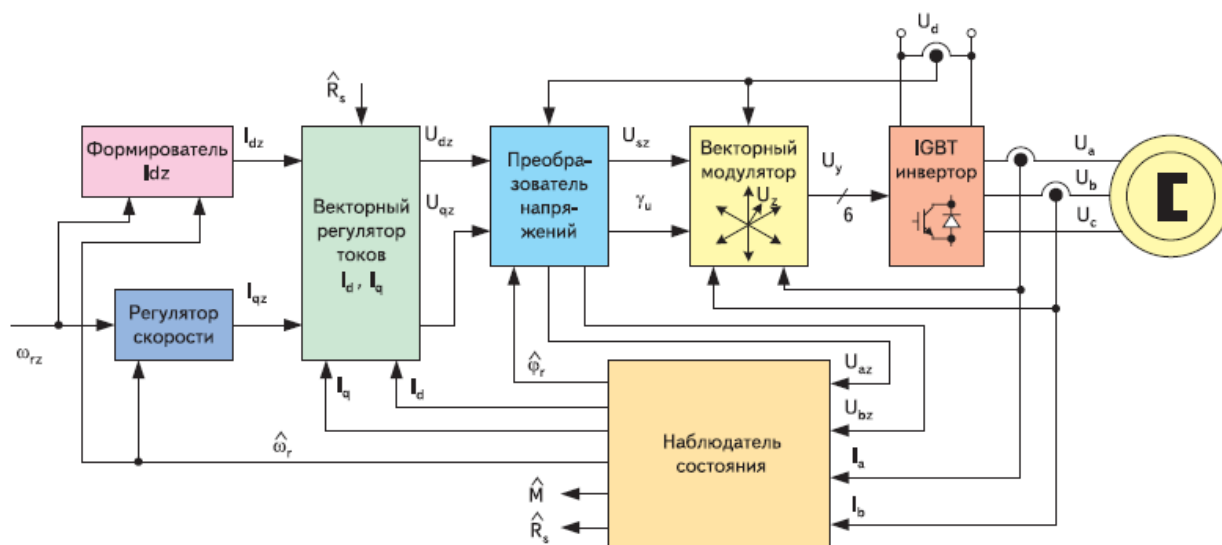


Рисунок 5.15 – Структурная схема синхронного бездатчикового электропривода, описанная в работе [96]

Особенностью реализованного в схеме ПЧ является исключение самых ненадежных и недолговечных элементов – электролитических конденсаторов и звена постоянного тока – и построение преобразователя по схеме матричного конвертора, выполняемого на IGBT-ключах двусторонней проводимости.

На рисунке 5.15 представлена структурная схема наблюдателя СДПМ. Рассмотрим его особенности. Для расчета необходимых переменных добавляется ортогональная система координат (x, y). Она вращается одновременно с частотой поля. В роли частоты вращения системы координат принята оценка частоты вращения вектора ЭДС $\hat{\omega}_\varepsilon$. Расчет ЭДС ротора происходит на основании цифрового решения уравнений статорной цепи синхронного двигателя с постоянными магнитами:

$$U_x = R_s I_x + L_s (dI_x/dt) - L_s \omega_x I_y + E_{rx};$$

$$U_y = R_s I_y + L_s (dI_y/dt) - L_s \omega_x I_x + E_{ry}$$

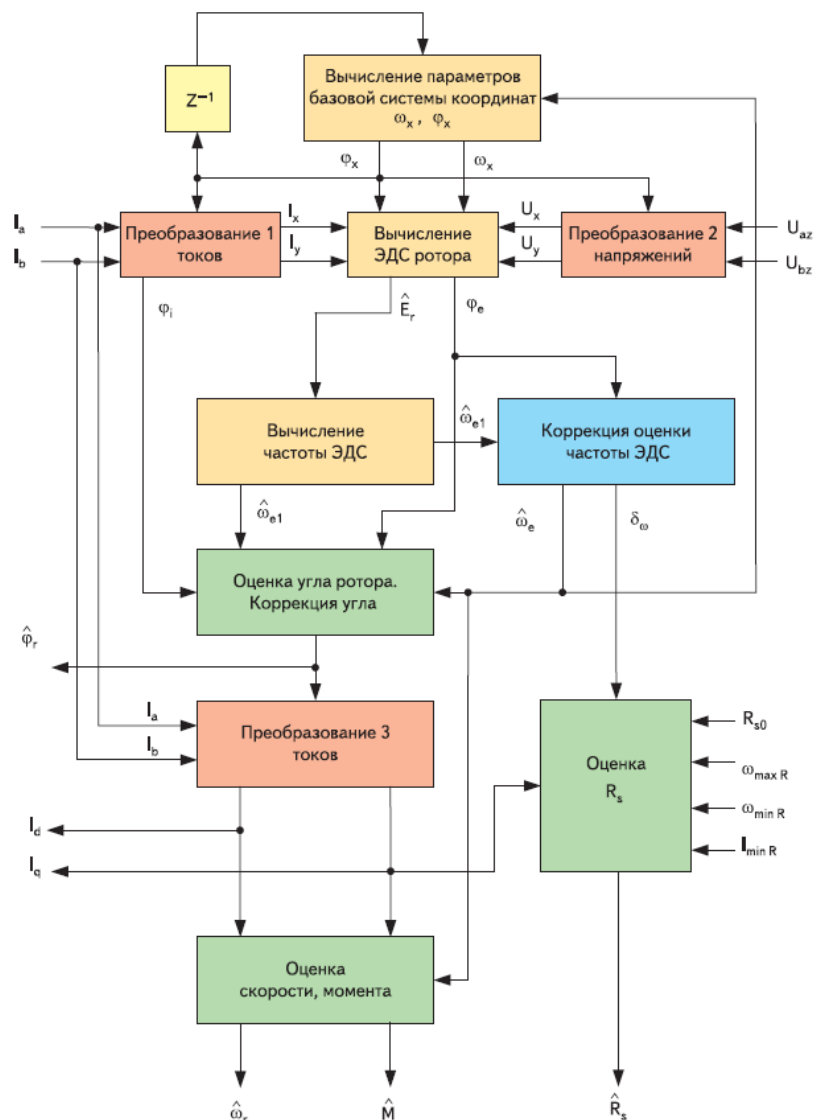


Рисунок 5.16 – Структурная схема наблюдателя с СДПМ

Оценка углового положения ротора $\hat{\varphi}_r$ складывается из информации об скорректированной оценке частоты вращения вектора ЭДС $\hat{\omega}_e$ и угловом положении вектора ЭДС ω_e . Угловые положения вектора ЭДС ротора не совпадают друг с другом на угол $\pm\pi/2$. Знак несовпадения устанавливается направлением вращения вектора ЭДС (знаком частоты ЭДС). По причине того, что на малых частотах величина ЭДС ротора стремится к нулю, интервал расчета положения вектора ЭДС с заданной точностью ограничен минимальным значением частоты $\omega_{e\ min}$.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Для обеспечения работоспособности ЭП на частотах, меньших $\omega_{e\ min}$ и необходимости создания момента в режиме неподвижного вала происходит трансформация от ориентирования по вектору ЭДС к режиму создания вектора тока статора. При этом контур скорости размыкается, и далее ЭП начинает работать в режиме отработки задания по току. Скорость вращения ротора в таком случае определяется частотой заданного тока. Величина тока в режиме неподвижного вала определяет максимальное значение момента в этом режиме и параметризуется при настройке привода.

Быстродействующая цифровая система векторного управления обеспечивает высокие показатели регулирования:

- точность поддержания выходного напряжения при отклонениях напряжения питания от -15% до +10% и изменении тока нагрузки от холостого хода до $I_{ном}$ - не хуже 5%;
- диапазон изменения установки $\cos \varphi$ – от 0,7 отстающего до 0,7 опережающего;
- рабочий интервал изменения выходного постоянного напряжения при питании от промышленной 3-фазной сети 380 В, 50 Гц – от 580 до 650 В;
- время восстановления – не более 50 мс;
- переходное отклонение выходного напряжения в режиме ступенчатого наброса номинальной нагрузки – не более 30 В.

В результате испытаний были получены характеристик привода, полностью удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к безредукторному электроприводу кабины лифта с максимальной скоростью перемещения 2 и 2,5 м/с. На рисунке 5.16 приведена временная диаграмма скорости привода, полученная при его работе в режиме отработки типовой циклограммы движения лифта.

5.11 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ОДНОСТОЕЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

Как было сказано в главе 5, реализуемая система стабилизации состоит из:

- собственно стабилизатора – обеспечивает фиксацию выставленного положения;
- гироскопа – необходим для установления и регулировки положения платформы после сборки.
- концевого выключателя – определяет, опущен ли стабилизатор на поверхность установки или нет.

Для реализации этой системы выберем каждый из компонентов и спроектируем всю систему.

Для определения наклона платформы подъемника используем двухстепенной гироскоп LPY430AL фирмы «STMicroelectronics».

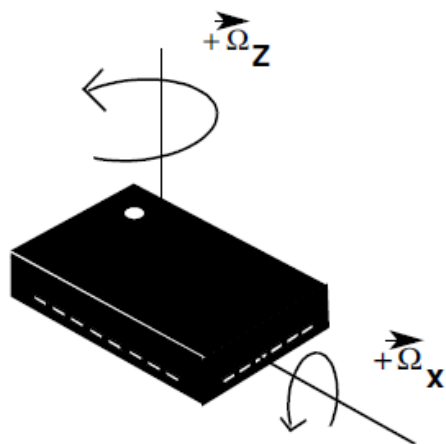


Рисунок 5.18 – Внешний вид гироскопа LPY430AL

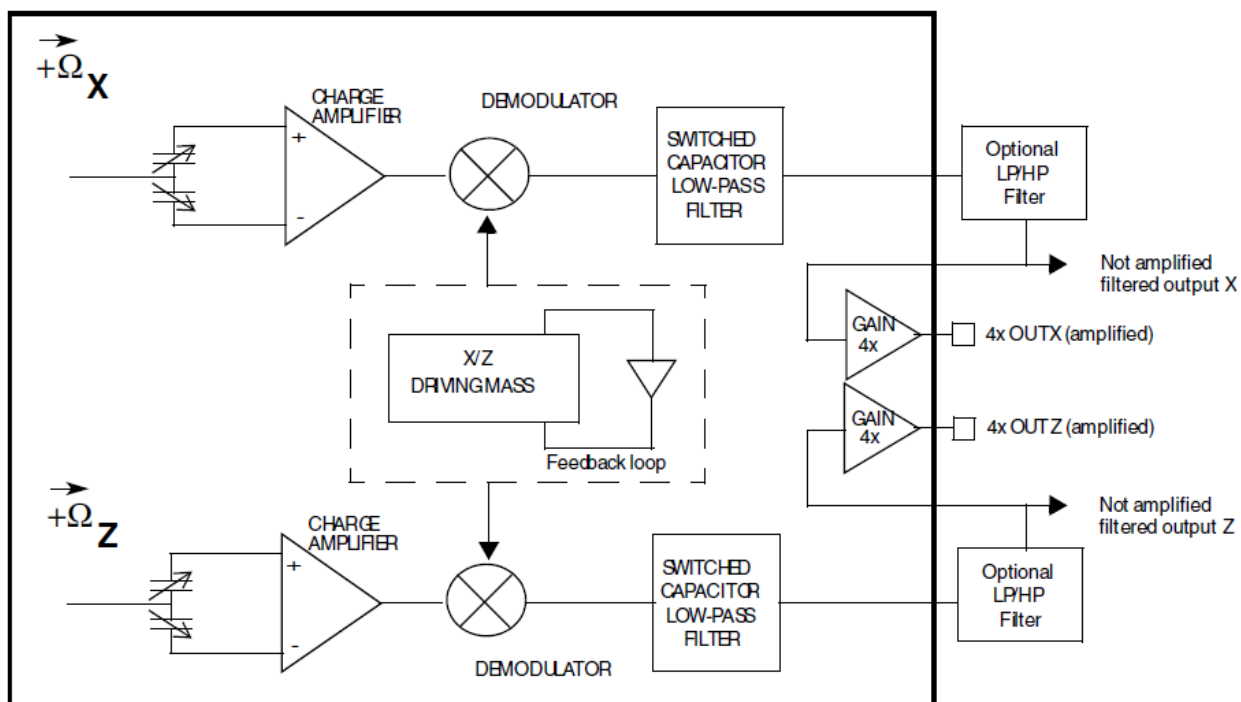


Рисунок 5.19 – Блок-схема гироскопа LPY430AL [118]

Для того, чтобы определить, опущен ли стабилизатор на поверхность установки или нет, выберем концевой выключатель МТВ4-LZ8111 фирмы «Meyertec».

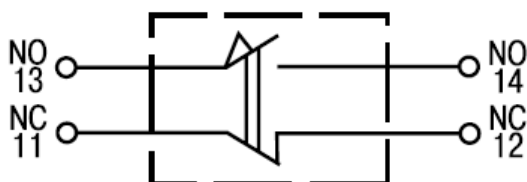


Рисунок 5.20 – Схема включения концевого выключателя МТВ4-LZ8111

Таблица 5.3 – Характеристики концевой выключателя МТВ4-LZ8111

Скорость срабатывания	0,25 – 1,3 м/сек
Степень защиты	IP65
Номинальное напряжение	24 В
Номинальный ток, А	3
Скорость срабатывания, м/с	0,25

С целью обеспечения питанием системы стабилизации выберем дополнительный к основному блок питания PSM-72-24 фирмы «КонтрАвт».

Таблица 5.4 – Технические характеристики блока питания PSM-72-24

Входное напряжение, В	Д
Выходная мощность, Вт	72
Номинальное напряжение	$24 \pm 0,5$
Максимальный ток нагрузки, А	3
Защита	– от перегрузки по току; – от перегрева; – от КЗ на входе
КПД	0,8, не менее

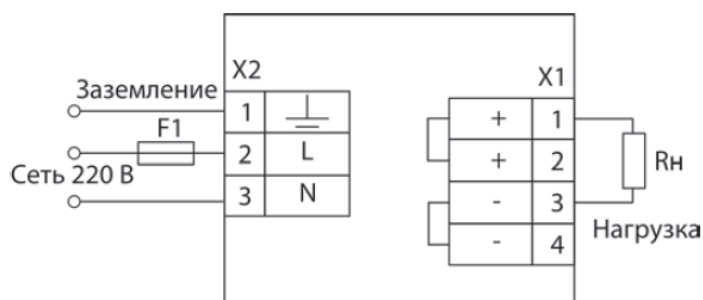


Рисунок 5.21 – Схема включения блока питания PSM-72-24

Для автоматической стабилизации платформы подъемника также используем адаптивный наблюдатель с эталонной моделью (MRAS), уравнения работы которого запишем в выбранный микроконтроллер ATmega8535 фирмы «Atmel».

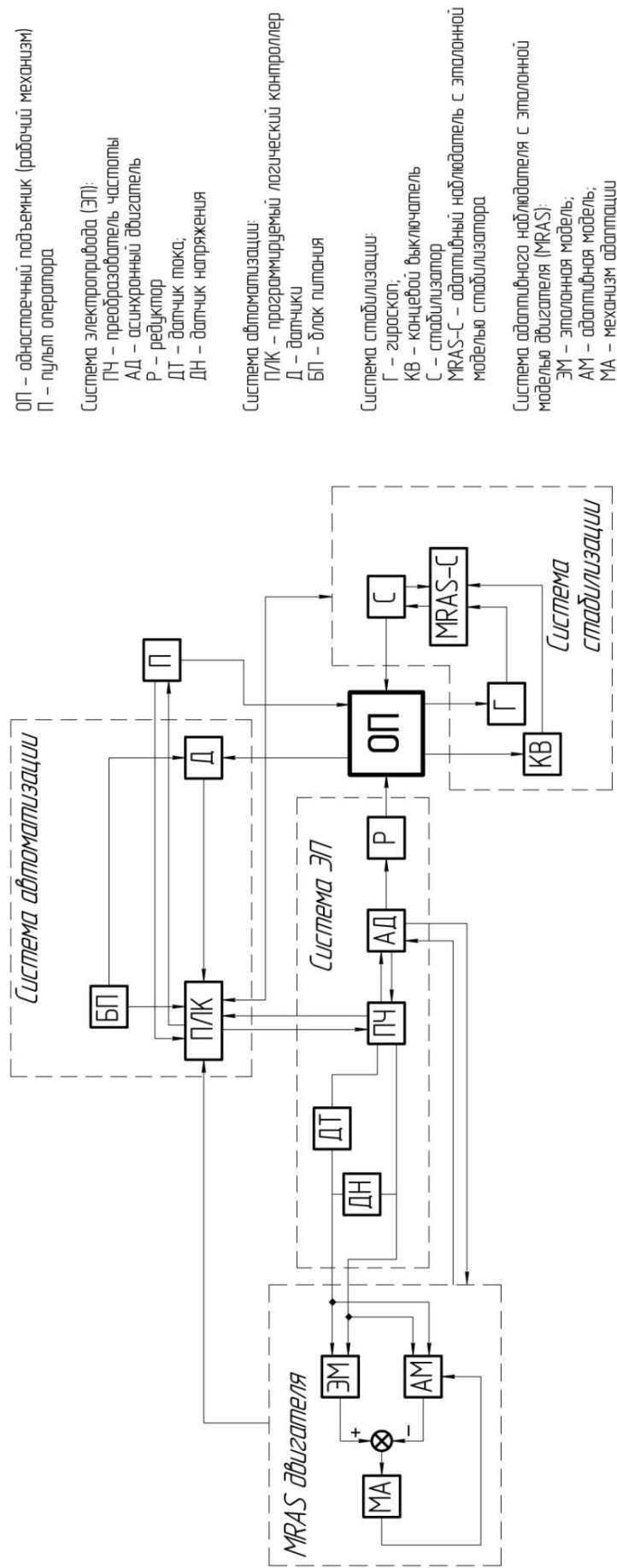


Рисунок 5.27 – Структурная схема модернизированного автоматизированного одноступенчатого подъемника с повышенной точностью позиционирования груза

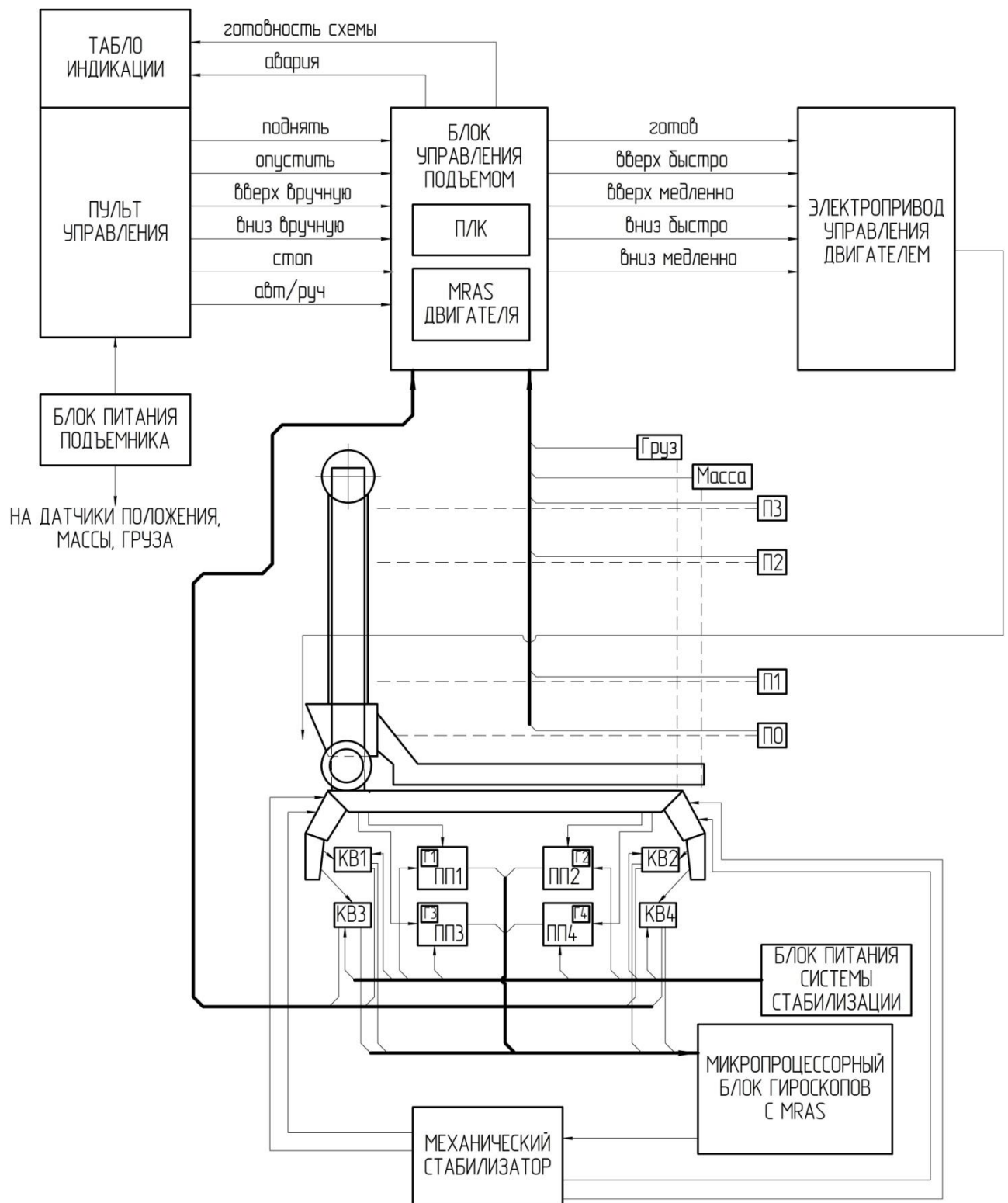


Рисунок 5.28 – Функциональная схема модернизированного автоматизированного одностоечного подъемника с повышенной точностью позиционирования груза: Г – гироскоп, ПЛК – программируемый логический контроллер, ПП – плата сигнала гироскопа о положении платформы, КВ – концевой выключатель

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

5.12 ОБЗОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА, РАЗРАБОТАННЫХ СПЕЦИАЛЬНО ДЛЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Как было сказано в п.5.2, всемирно известные корпорации, занимающиеся разработкой систем управления электроприводами, последнее время активно развивают направление по созданию специализированных бездатчиковых электроприводов.

1. Транзисторные пускорегулирующие устройства «ЭРАТОН-Р»

Устройства пусковые комплектные «ЭРАТОН-Р» предназначены для плавного пуска промышленных механизмов, приводимых в движение высоковольтными асинхронными двигателя с фазным ротором. Благодаря предварительному плавному выбору люфтов, зазоров и «преднатяжению» элементов передачи с программируемым темпом перед процессом запуска, а также стабилизации пускового тока (или динамического момента) устройства позволяют значительно повысить сроки службы элементов механического оборудования и уменьшить простои, связанные с их выходом из строя. Эти особенности устройств обуславливают преимущества использования «ЭРАТОН-Р» в электроприводах механизмов с большими приведенными маховыми массами (конвейеры, мельницы, дробилки и т.д.), и в механизмах с тяжелыми условиями эксплуатации, в том числе – шахтных подъемниках.

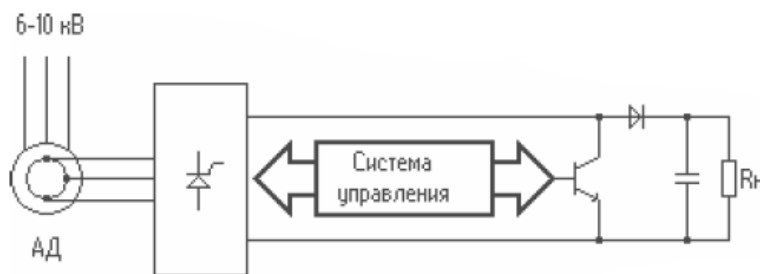


Рисунок 5.29 – Функциональная схема шкафа управления «ЭРАТОН-Р»

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Силовая схема шкафа управления «ЭРАТОН-Р», функциональная схема которого представлена на рисунке 5.29, состоит из трехфазного мостового выпрямителя, подключенного к выводам фаз обмотки ротора (контактным кольцам) двигателя, транзисторного замыкателя (чоппера) со снаббером и емкостного фильтра. К выводам шкафа подключен балластный резистор, определяемый из условий создания номинального (или 120%-ного) момента при пуске двигателя [121].

2. Преобразователь частоты для асинхронных и синхронных крановых электроприводов с векторным управлением «ЭРАТОН-М5»

Наиболее перспективными в реализации являются структур в частотно-регулируемом ЭП, где в качестве управляемой электрической машины используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ).

Серия преобразователей частоты «ЭРАТОН-М5», производства ЗАО «ЭРАСИБ» обеспечивает адаптивное бездатчиковое векторное управление АД или СДПМ. Электропривод данной серии находят свое применение в качестве ЭП подъема кранов и шахтных лифтов, обеспечивая диапазоны регулирования скорости не ниже 50:1. Функциональная схема системы управления «ЭРАТОН-М5» изображена на рисунке 5.30, где АИР – автономный инвертор напряжения; РТ – регулятор токов двигателя во вращающейся системе координат; РС и РП – регуляторы скорости и магнитного потока. В алгоритме управления реализованы современные подходы к построению так называемых «интеллектуальных» преобразователей частоты [121, 122].

										Лист
										124
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

Особенности кранового электропривода «ЭРАТОН-М5»:

– электропривод крановый частотно-регулируемый с прямым цифровым управлением предназначен для использования в механизмах подъема мостовых, козловых и др. видов подъемных кранов, предъявляющих высокие требования к перегрузочной способности на низких скоростях и динамичности по возмущающему воздействию – активному моменту сопротивления нагрузки;

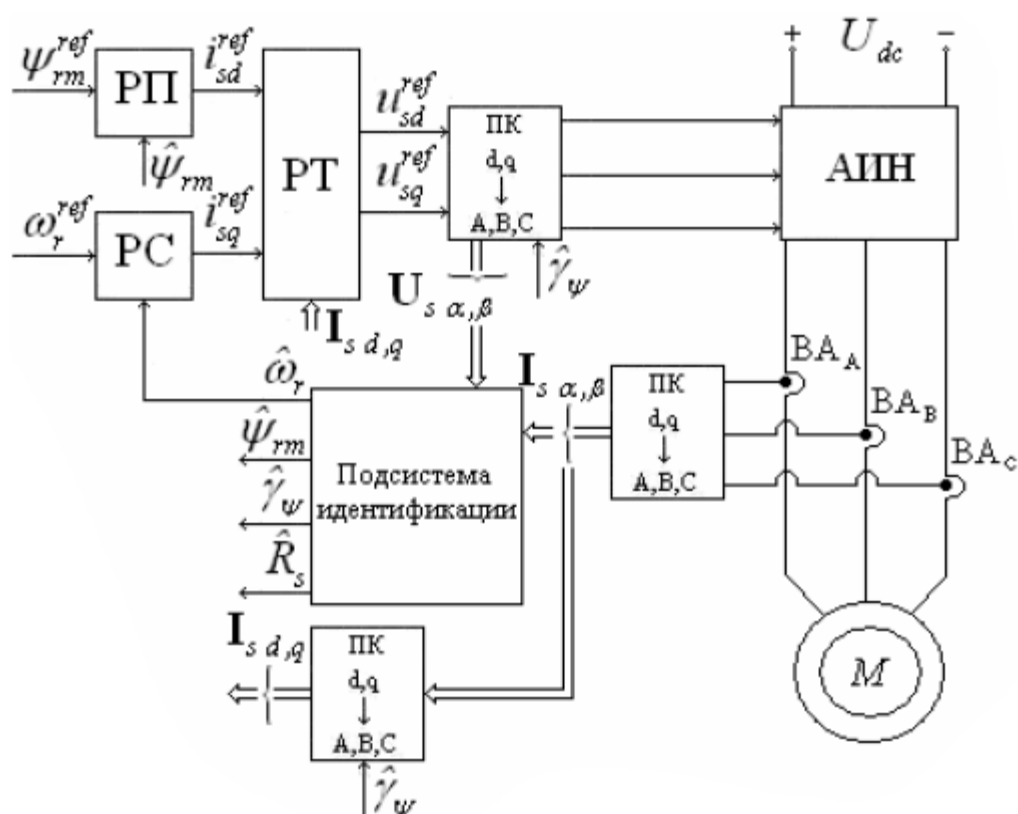


Рисунок 5.30 – Функциональная схема системы управления «ЭРАТОН-М5»

– может применяться при модернизации электроприводов на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, не имеющих на валу датчиков положения (частоты вращения). Датчиковые приводы «ЭРАТОН-М5» в качестве датчиков положения и скорости вала двигателя используют фотоэлектрические инкрементальные энкодеры;

– благодаря созданному специалистами алгоритму управления достигаются максимальные моменты от 160 до 250% от номинального при ограничении тока двигателя и полосе пропускания частот системы регулирования скорости от 2,5 до 25 (для малой мощности) Гц;

– в сочетании с устройством рекуперативного выпрямления (общего для всех электроприводов крана) или при оснащении балластным резистором обеспечивает глубокое регулирование скорости во всех четырех квадрантах плоскости механических характеристик [121].

3. Преобразователи частоты серии ЭПВ производителя ООО«ЭЛПРИ»

Преобразователи частоты серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных «интеллектуальных» устройств управления низковольтными (до 440 В) электродвигателями переменного тока (асинхронными и синхронными, мощностью от 1 до 400 кВт), предназначенными для регулируемого привода механизмов и технологических процессов с самыми различными требованиями к параметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточных станков и следящих систем.

Особенности преобразователей частоты серии ЭПВ:

– Улучшенными показателями регулирования скорости (быстродействием, диапазоном);

– Существенно расширенными функциями интерфейса и повышением производительности интерфейсных каналов;

– Введением развитых функций программирования пользователем для решения разнообразных технологических задач;

– Режим приспособления (адаптации) к отклонению активных сопротивлений двигателя от номинальных, что обеспечивает симметричность характеристик ЭП к температурным отклонениям сопротивлений ротора и статора;

– Встроенная автоматическая настройка ЭП на необходимые для системы технические характеристики (время регулирования, полоса пропускания контура скорости, вид переходного процесса), а также возможность будущей точной подстройки в ручном режиме с помощью тестовых входных сигналов и настроечных рекомендаций;

– Наличие двух встроенных коммуникационных портов (RS-232/485 и CAN), поддержка MODBUS и CAN-Open – стандартных протоколов связи позволяет встраивать ЭП в АСУ ТП, локальные информационно-управляющие сети и др. системы без затрат времени на освоение специфических средств коммуникации;

– Частота модуляции 2-20 кГц (программируемая) позволяет для любых сфер применения находить приемлемое соотношение между вибрациями двигателя, шумами и дополнительными потерями в системе «ПЧ-АД»;

– Предназначенные для встраивания ПЧ в специфические технологические процессы (станции управления лифтами, управление многонасосной станцией, управление механизмами с упругой механикой и т.д.) программные макросы.

Серия ЭПВ выпускается в исполнении бездатчикового АЭП мощностью от 3 до 400 кВт, которые предназначены и могут быть использованы для механизмов с интервалом регулирования скорости до 50:1, где нет повышенных требований к точности регулирования скорости и быстродействию (вентиляторы, насосы, подъемно-транспортные средства и др.).

Основные характеристики преобразователей частоты серии ЭПВ:

- рабочий диапазон частот: 0-400 Гц;
- напряжение питания: 380 В +10/-15 %, 48-63 Гц;
- допустимая перегрузка по току с типовым двигателем: 1,5 в течение 30 с, 2 в течение 5 с [123].

6. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ MRAS В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Адаптивный наблюдатель с эталонной моделью хорошо себя зарекомендовал не только достоинствами, описанными в пп.5.3.2, 5.7, но и низкой погрешностью. Это подтверждено достаточным количеством публикаций.

В работе [101] проводилось моделирование двигателя АКМ114/10 (200 кВт, пять пар полюсов, фазный ротор замкнутый накоротко) по схеме слежения во всех четырех квадрантах. Разработана векторная система управления этим двигателем и спроектирован наблюдатель на основе фильтра Кальмана и MRAS.

На рисунках 6.1 и 6.2 приведены ошибки слежения за скоростью наблюдателями на основе MRAS и фильтра Кальмана при идеализированных условиях и отсутствии каких либо возмущающих воздействий. Из рисунков видно, что в данных условиях ошибка слежения у первого наблюдателя (0,4 %) несколько меньше, чем у второго (0,6 %) [101].

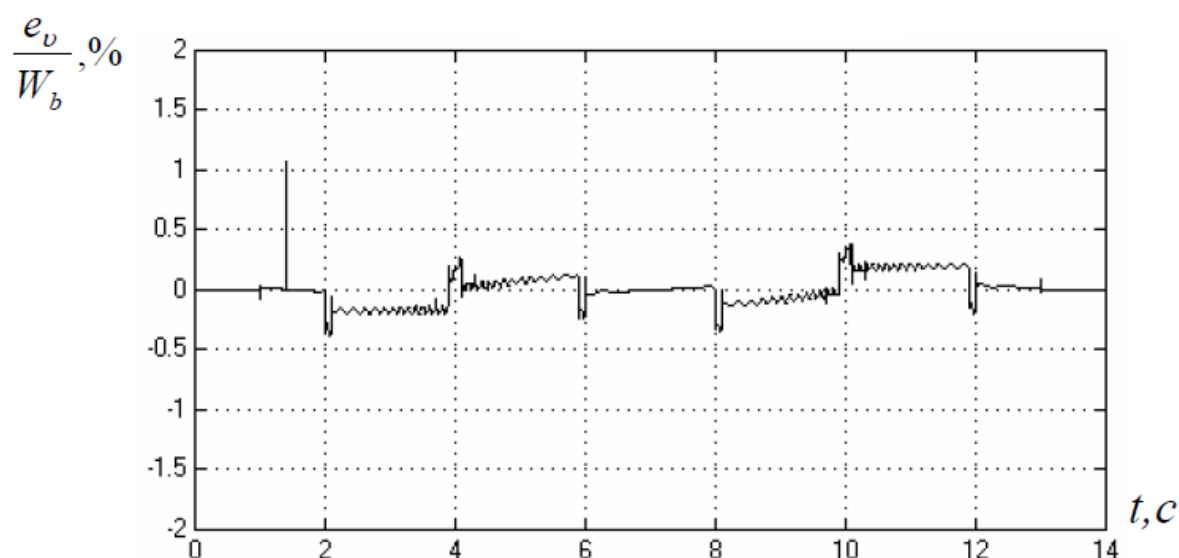


Рисунок 6.1 – Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе MRAS

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

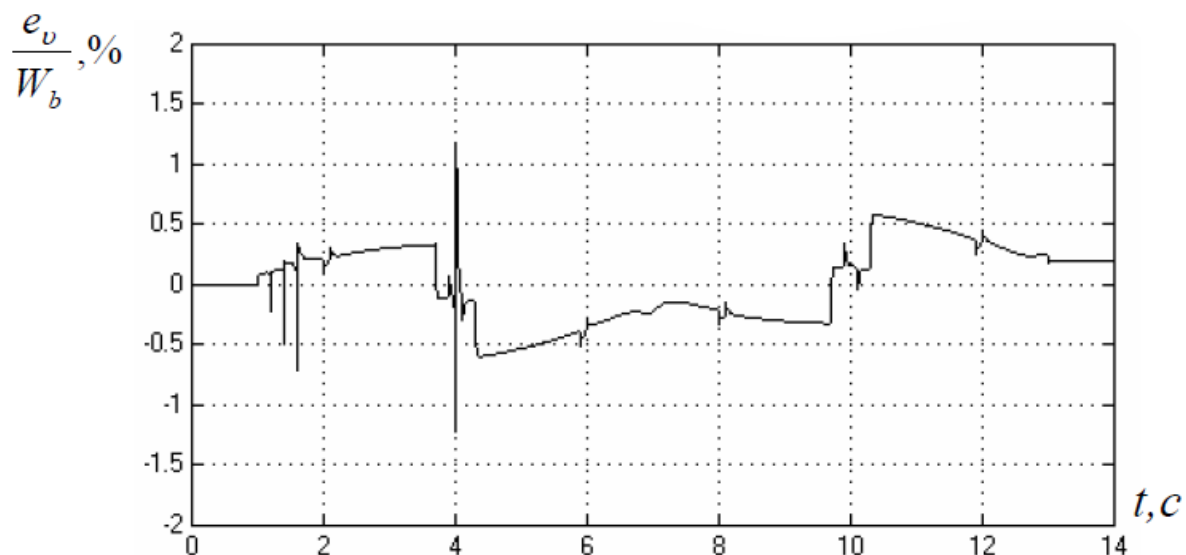


Рисунок 6.2 – Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе фильтра Кальмана

В [129] производилось моделирование синхронного генератора, управление которым производилось на базе позиционно-траекторного регулирования с использованием алгоритмов адаптации с эталонной моделью. Результаты моделирования представлены на рисунках ниже, где сплошной линией обозначены параметры исследуемой модели, а параметры эталонной модели.

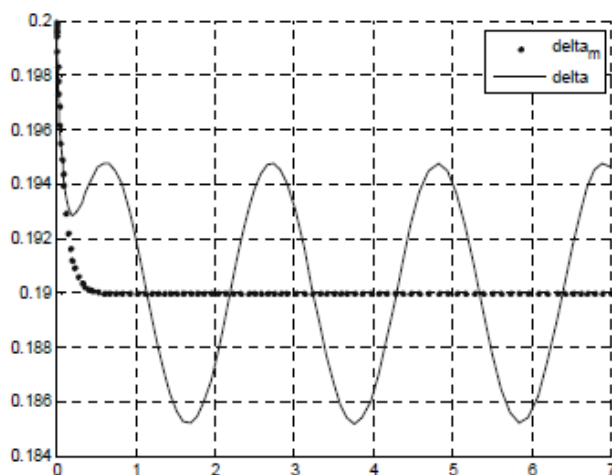


Рисунок 6.3 – Угол δ

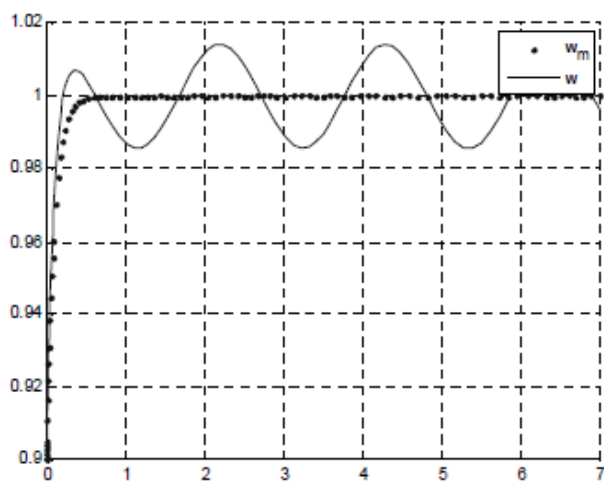


Рисунок 6.4 – Частота вращения

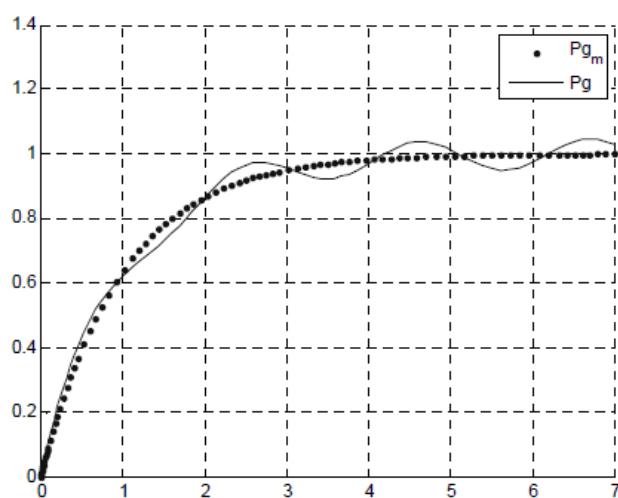


Рисунок 6.5 – Генерируемая мощность

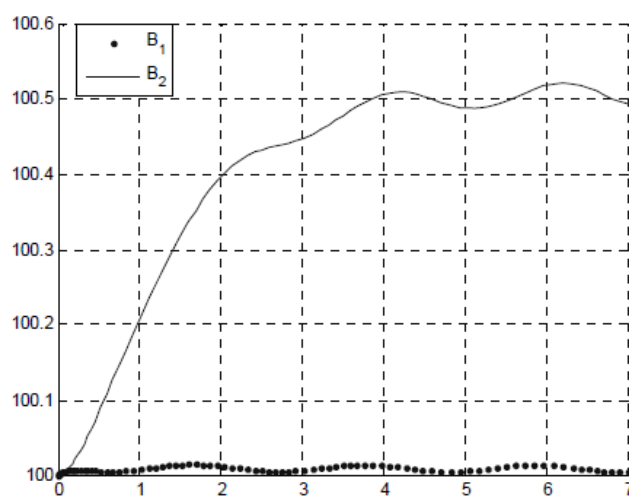


Рисунок 6.6 – Коэффициент адаптации

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Полученные результаты моделирования показывают, что адаптивный наблюдатель с эталонной моделью MRAS с высокой точностью следит за эталонной моделью и позволяет подавить возникающие возмущения в исследуемой системе, а отклонения значений переменных эталонной модели и исследуемой зависят от параметров быстродействия регулятора [129].

										Лист
										131
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>					

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной научной работе (диссертации) разработана система автоматизации стационарного грузового мобильного одностоечного подъемника с электрическим приводом с повышенной точностью позиционирования груза (далее – одностоечный подъемник). Эта точность обеспечивается за счет введения системы стабилизации и косвенных методов. За основу взят автоматизированный электропривод одностоечного подъемника, расчет и автоматизация которого были произведены в бакалавриате. Цель данной разработки – расширение областей применения этих подъемников, а том числе для использования в автоматизированных складах, автоматизированных автомобильных сборочных конвейерных лентах.

Проведен анализ научно-технической литературы о грузоподъемных механизмах. Приведена принятая в технической среде классификация этих механизмов, проанализированы их особенности и сферы применения. На основании приведенной классификации в качестве объекта автоматизации выбран одностоечный подъемник.

В качестве системы электропривода был выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором фирмы Leroy Somer (группа компаний Emerson) на номинальную мощность 30 кВт и преобразователь частоты Unidrive SP на номинальную мощность 37 кВт. Был произведен расчет статических и динамических усилий электропривода подъемника. Выбранный электродвигатель прошел проверку по перегрузочной способности в течение времени разгона и торможения.

Также была произведена автоматизация на программируемом логическом контроллере фирмы Automation Direct. Исходя из технологических требований и требований, предъявляемых системе автоматизации, была разработана программа функционирования подъемника.

									Лист
									132
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ				

Главным условием правильного функционирования составленного алгоритма является работа подъемника согласно техническому заданию.

С целью удовлетворения ужесточающимся требованиям и повышению точности выполняемых функций, в частности позиционирования груза, был осуществлен переход от разомкнутой системы электропривода к бездатчиковому:

1. был проведен анализ более чем 130 русско- и англоязычных источников на наличие существующих методов косвенной оценки (в данной выпускной квалификационной научной работе (диссертации) указаны несколько из них). Выбраны несколько, наиболее часто используемые, описаны; рассмотрены достоинства, точность, недостатки;

2. проведено сравнение описанных методов. На основании предъявляемых к одностоечному подъемнику требований выбран адаптивный наблюдатель с эталонной моделью (MRAS);

3. проанализировано состояние и оценены перспективы развития работ по бездатчиковым системам.

Адаптивный наблюдатель с эталонной моделью использован в системах управления электроприводом (бездатчиковое определение скорости) и стабилизации (автоматическая стабилизация платформы одностоечного подъемника).

Использование MRAS позволяет не только уменьшить стоимость реализации и обслуживания системы управления электроприводом и рабочего механизма в целом (по сравнению с замкнутыми электроприводами), но и повысить точность выходных параметров, в том числе позиционирования груза.

Также введена система стабилизации:

1 в качестве ее элементов выбран двухстепенной гироскоп LPY430AL фирмы «STMicroelectronics», концевой выключатель МТВ4-LZ8111 фирмы «Meyertec». Для питания системы стабилизации подобран блок питания PSM-72-24 фирмы «КонтрАвт», в котором заложены необходимые для подъемника защиты;

2 реализация система автоматической стабилизации платформы подъемника с помощью адаптивного наблюдателя с эталонной моделью (MRAS) выполнена с помощью микроконтроллера ATmega8535 фирмы «Atmel».

Для большего понимания работы модернизированного одностоечного подъемника составлены структурная и функциональная схемы.

Кроме того, в разделе 5.12 приведено описание бездатчиковых электроприводов российского производства, выпускаемых специально для работы в грузоподъемных механизмах. В разделе 5.2 представлено краткое описание серий бездатчиковых электроприводов зарубежного производства.

										Лист
										134
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. Вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. Шк., 1985. – 520 с.,ил.
2. <http://www.str-t.ru> - «Построй техника. Оборудование для строителей» (актуально на 01.05.2017).
3. Драчев, Г.И. Теория электропривода: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2012. – 168 с
4. <http://elektrostil.oml.ru/d/323483/d/teo.pdf> - Технико-экономическое обоснование внедрения автоматизированных систем частотно-регулируемого электропривода на объектах (актуально на 01.05.2017).
5. <http://stroy-technics.ru> - Строительные машины и оборудование. Справочник (актуально на 01.05.2017).
6. <http://vecgroup.ru> - Серия LS. Общепромышленные электродвигатели Leroy Somer (актуально на 01.05.2017).
7. <http://www.motor-reductor.ru> - Каталог редукторов (актуально на 01.05.2017).
8. <http://vecgroup.ru> – Многофункциональные электроприводы Unidrive SP (актуально на 01.05.2017).
9. <http://www.servotechnica.ru> – Частотные преобразователи серии Unidrive SP (актуально на 01.05.2017).
10. <http://www.briznsk.ru> - Преобразователи частоты Unidrive SP (актуально на 01.05.2017).
11. <http://www.plcsystems.ru> – Многоблочный контроллер DirectLogic05 (актуально на 01.05.2017).
12. <https://www.chipdip.ru> - Блок питания DRP-240-24 (актуально на 01.05.2017).
13. <http://www.ferrol.ru> - Промежуточное реле (актуально на 01.05.2017).

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		135

14. <http://www.elvs.su> - Контактор Schneider Electric (актуально на 01.05.2017).

15. <http://www.iek.ru> – Автоматический выключатель ИЕК (актуально на 01.05.2017).

16. <http://uralves.ru> - Балочный датчик УРАЛВЕС (актуально на 01.05.2017).

17. <https://www.chipdip.ru> - Тумблер с подцветкой (актуально на 01.05.2017).

18. <http://www.electromir.com> – Кнопочные переключатели/кнопки ЕАО серии 84 (актуально на 01.05.2017).

19. <http://www.etm.ru> - Лампа сигнальная светодиодная (актуально на 01.05.2017).

20. <http://www.etm.ru> - Лампа LED (актуально на 01.05.2017).

21. Балонин Н. А., Попов О.С. Идентификация параметров систем в режиме их нормального функционирования / Н. А. Балонин, О.С. Попов // Автоматика и телемеханика, 1992, № . – С. 98-103.

22. Афанасьев В.Н. Управление неопределенными системами: Учебн. Пособие. – М.: РУДН, 2008. – 325 с.

23. Адаптивные системы автоматического управления: Учебное пособие / В.Н. Антонов, А.М. Пришвин, В.А. Терехов, А.Э. Янчевский / Под ред. Проф. В.Б. Яковлева. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 204 с.

24. Приспосабливающиеся автоматические системы / Под ред. Э. Мишкина, Л. Брауна. М., 1963. – 670 с.

25. Шатов Д.В. Частотное адаптивное управление с модальным синтезом и его применение для настройки ПИД-регуляторов / диссертация канд. техн. наук. – Москва. – 2016. – 101 с.

26. Whitaker H.P., Yamron J., Kezer A. Design of Model Reference Adaptive Control Systems for Aircraft // Report R-164, Instrumentation Laboratory, MIT, Cambridge, M.A., 1958.

27. Parks P.C. Lyapunov redesign of model reference adaptive control system // IEEE Trans. Automat. Control, 1966. – V. AC-11. No 3. – P. 362-367.

28. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Обобщенный алгоритм адаптации одного класса беспойсковых самонастраивающихся систем с моделью // Автом. и телемех., 1967. – Т. 28. № 6. – С. 88-94.

29. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М: Наука, 1968. – 400 с.

30. Egardt B.E. Stability of Adaptive Controllers // Lectures Notes in Control and Inform. Sci. 20 Springer-Verlag, New-York, 1979.

31. Ioannou P.A., Kokotovic P.V. Instability analysis and improvement of robustness os adaptive control // Automatica. – V.20, 1984. – P. 583-594.

32. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука. 1981.

33. Житецкий Л. С., Скурихин В. И. Адаптивные системы упавления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями. – Киев.: Наукова думка. 1981

34. Ioannou P.A., Fidan B. Adaptive Control Tutorial // SIAM, Philadelphia, – 2006.

35. Tao G. Adaptive Control Design and Analysis // John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, – 2003.

36. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. И. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими система – СПб.: Наука. 2000.

37. Земляков С.Д, Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практического применения беспойсковых адаптивных систем / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. - 2001. – № 7.

38. Жук А.Ю.. Адаптивные системы управления / А.Ю.Жук // Молодежный научный вестник». – 2013, май №5.

39. <https://ru.wikipedia.org> – Гиростабилизатор (актуально на 15.04.2017)

										Лист
										137
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

40. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М, «Машиностроение», 1976. – 184 с.

41. Куксин, А.В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода / А.В. Куксин, А.В. Романов. – http://andr-romanov.narod.ru/Lib/st2009_Kyksin1.pdf

42. Kubota H. DSP-based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor / H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano // IEEE Transaction on Industry Application, vol. 29, no. 5, March/April 1993, pp. 344-348.

43. Панкратов В.В. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения / В.В. Панкратов, М.О. Маслов // «Силовая интеллектуальная электроника». – 2007, № 1 (6)

44. Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.: 05.09.03. Д.А. Котин; науч. рук. В.В. Панкратов – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 162 с.

45. Диаб Ахмед А.З. Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогнозирующих моделей: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.:05.09.03. А.З. Диаб Ахмед; науч. рук. В.В. Панкратов, В.Н. Аносов – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 194 с.

46. Kubota H. Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation / H. Kubota, K. Matsuse // IEEE Transactions of industry Application, vol. 30, no. 5, September/October 1994, pp. 1219-1224.

47. Kubota H. Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer / H. Kubota, I. Sato, Y. Tomura, K. Matsuse // IEEE Transactions of industry Application, vol. 38, no. 4, July/August 2002, pp. 1081-1086.

48. В. Г. Каширских, Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. ГУ КузГТУ, Кемерово, 2005. 139 с.

49. Макаров В.Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по бездатчиковому определению скорости электропривода / В.Г. Макаров, В.В. Тамбов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013, том 16, № 21. – С. 245-248.

50. Тимошкин В.В. Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.: 05.09.03. В.В. Тимошкин; науч. рук. А.С. Глазырин - Томск: НИТПУ, 2014. – 153 с.

51. Г.Г. Соколовский, Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Изд. центр «Академия», Москва, 2006. 265 с.

52. Schröder P. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebs systemen. Springer, Berlin, 2001, S. 1172.

53. Пат. РФ 2385529 (2008).

54. Пат. РФ 2476983 (2011).

55. Преобразователи частоты (<http://chastotnik.com/>).

56. Преобразователи частоты Mitsubishi FR-A740 (http://es-electro.ru/market/goods/preobrazovateli_chastoty_mitsubishi_fr_a740_101/).

57. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ (<http://www.vectorgroup.ru/articles/article12>).

58. Ланграф С.В. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Кальмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова // Известия Томского политехнического университета. – 2010, Т. 317, № 4. – С. 120-123.

59. http://info.alnam.ru/book_tinfo.php?id=61 – Научная библиотека избранных естественно-научных знаний (актуально на 19.04.2017).

82. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / под общ. ред. А.А. Колесникова. – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 279 с.

83. Ланграф С.В. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, К.С. Афанасьев // «Известия вузов. Электромеханика». – 2011. - № 6. – С. 57-61

84. Веселов Г.Е. Прикладная теория и методы синергетического синтеза иерархических систем управления: дис. д-ра техн. наук. – Таганрог, 2006. – 322 с.

85. Браммер К., Зифлинг Г. Фильтр Кальмана-Бьюси / Пер. с нем. под ред. И.Е. Казакова – М.: Наука, 1982. – 199 с.

86. Bose V.K. Modern power electronics and AC drive. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. – 710 p.

87. Козлова Л.Е. Исследование наблюдателей состояния для применения в управлении электроприводами / Л.Е. Колова, Л.А. Паюк // Научный вестник НГТУ. – 2016. – т. 63, № 1. – с 7-16.

88. Клепиков В.Б. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводом / В.Б. Клепиков, С.А. Сергеев, К.В. Махотило, И.В. Обруч // Электротехника. – 1999. - №5 – С. 2-6.

89. Narendra K.S., Parthasarathe K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. on Neur. Net.. – 1990. – vol. 1/ - N 1. – pp. 4-27.

90. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашов, С.А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.

										Лист
										142
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

91. Горбачевская Е.Н. История развития нейронных сетей / Е.Н. Горбачевская, С.С. Краснов // Вестник Волжского университета имени В.Н Татищева, №1 (23). – 2015.

92. Цой, Ю.Р. Эволюционный подход к настройке и обучению искусственных нейронных сетей / Ю.Р. Цой, В.Г. Спицын // Нейроинформатика. - 2006. - Т. 1. - №1. - С. 34-61.

93. Романов, В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике: Учебное пособие / В.П. Романов; под ред. д.э.н., проф. Н.П. Тихомирова. - М.: Экзамен, 2003. - 496 с.

94. Мареев, С.Н. История философии (общий курс): Учебное пособие / С.Н. Мареев, Е.В. Мареева - М.: Академический Проект, 2004. - 880 с.

95. <http://ru.cybernetics.wikia.com> – Перцептрон (актуально на 04.05.2017).

96. Виноградов А. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов / А. Виноградов, А. Сибирцев, С. Журавлев // Силовая электроника. – 2007. - № 1. – С. 46 – 52.

97. Панкратов В.В. Отечественные электроприводы подъемно-транспортных механизмов: разработки ЗАО «ЭРАСИБ» / В.В. Панкратов, В.М. Берестов // Электротехника, электромеханика, электротехнологии ЭЭЭ-2009: матер. четвертой науч.-техн. конф. С международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 139-147.

98. Панкратов В.В. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учеб. пособие / В.В. Панкратов, Д.А. Котин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 143 с.

99. Doki, S. Implementation of speed-sensorless field-oriented vector control using adaptive sliding observers / S. Doki, S. Sangwongwanich, T. Yonemoto, S. Okuma // IECON, 16th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, Asilomar/Cal. – 1990. – pp. 453-458. Doki et. al. 1990

										Лист
										143
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ					

100. Вишнеvский, В.И. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода / В.И. Вишнеvский, С.А. Лазарев, П.В. Митюков // Вестник Чувашского университета. – 2010. №3. – С. 213-221.

101. Исаков А.С. Адаптивный наблюдатель состояний асинхронного двигателя в бездатчиковой системе векторного управления / А.И. Исаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. № 47. – С. 126-131.

102. Драчев Г.И. Теория электропривода. Часть 1: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. Часть 1. – 209 с.

103. Исаков, А.С. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления / А.С. Исаков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – №38.– С. 280–286.

104. С. Schauder, Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotation Transducer. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego Ca 1989, pp. 493-499.

105. Краснова, С.А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем / С.А. Краснова, В.А. Уткин – М.: Наука, 2006. – 272 с.

106. Дектярев, Е.А. Наблюдатели в управлении асинхронными электродвигателями / Е.А. Дектярев // Материалы Уральской горнопромышленной декады Энергосберегающие технологии. – 2005. – С. 194-195.

107. Sbita Lassaâd. An MRAS - based full Order Luenberger Observer for Sensorless DRFOC of Induction Motors / Sbita Lassaâd and Ben Hamed Mouna // ICGST-ACSE Journal, Volume 7, Issue 1, May 2007. pp. 11-20.

108. Tajima, H. Speed sensor less field-orientation control of the induction machine / H. Tajima, Y. Hori // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No 1, Jan/Feb. – 1993. – С. 175-180.

131. Красовский А.А. Науковедение и состояние теории практического управления / А.А. Красовский // Автоматика и телемеханика. – 2000. - № 4. – С 3-19.

132. Саридис Д.Н. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Д.Н. Саридис // М: Наука, 1980. – 401 с.

133. R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // Transactions of the ASME – Journal of Basic Engeneering. – 1960. - № 82 (Series D). – P. 35-45.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		147

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД – асинхронный электродвигатель.

АДКЗР – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

АНПП – адаптивный наблюдатель полного порядка.

АНЭМ – адаптивный наблюдатель с эталонной моделью.

АРТ – адаптивная резонансная теория.

ГА – генетический алгоритм.

ГПМ – грузоподъемные механизмы.

ИИ – искусственный интеллект.

ИАСС – алгоритм текущей идентификации активного сопротивления статора, построенный на основе адаптивного наблюдателя полного порядка. Адаптация к изменению активного сопротивления ротора осуществляется по оценке активного сопротивления статора в соответствии с первой тепловой моделью электрической машины.

ИНС – искусственная нейронная сеть.

ИЧВР – идентификатор частоты вращения ротора и ориентирующего вектора потокосцеплений ротора, построенный по методике адаптивных систем с задающей моделью. Структура идентификатора дополнена стабилизирующей добавкой, которая избавляет систему от недостатков, связанных с наличием разомкнутых интеграторов (нейтральной устойчивости).

ЛА- летательный аппарат.

ЛП – линия переключения.

МЦС – модель цепи статора.

НК – нейроконтроллер.

НПП – непосредственно наблюдатель полного порядка.

ОП – одностоечного подъемника.

ОУ – объект управления.

ПЧ-АД – система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

										Лист
										148
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

РМ – рабочий механизм.

СДПМ – синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

СМЦС – стабилизированная модель цепи статора.

СН – скользящий наблюдатель.

СУ – система управления.

СУЭП – системы управления электроприводами.

ФК – фильтр Кальмана.

ЭМС – электромагнитная совместимость.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2017.051.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		149