

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Общая теория электромеханического преобразования энергии
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Асинхронный электропривод портала балансировочной машины»

Студент

В.П. Коржев

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Научный
руководитель
Консультанты

В.А. Денисов

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

Содержание	
Введение.....	4
Глава 1 Исследование влияния изменения параметров и действия возмущений на эффективность работы привода портала балансировочной машины.....	9
1.1 Описание технологического процесса перемещения портала. Особенности кинематической схемы привода портала балансировочной машины	9
1.2 Основные требования, предъявляемые к приводу портала балансировочной машины.....	17
1.3 Анализ влияния изменения параметров электродвигателя и механической части на эффективность работы привода портала балансировочной машины.....	23
1.4 Выводы.....	26
Глава 2 Разработка математического описания и моделей системы с асинхронным двигателем портала балансировочной машины.....	27
2.1 Структурная схема позиционной системы с асинхронным двигателем портала балансировочной машины.....	27
2.2 Математическое описание позиционной системы с асинхронным двигателем с учётом изменения параметров и действия возмущений.....	37
2.3 Исследование рабочих режимов с учётом изменения параметров системы и действия возмущений.....	44
2.4 Выводы.....	61
Глава 3 Оптимизация и настройка параметров регуляторов позиционного электропривода с асинхронным двигателем привода портала.....	62

3.1 Оптимизация контуров регулирования позиционного электропривода с асинхронным двигателем и векторным управлением.....	62
3.2 Математическое моделирование и исследование работы асинхронного двигателя с векторным управлением.....	67
3.3 Исследование рабочих режимов с учётом изменения параметров системы и действия возмущений.....	82
Выводы.....	93
Заключение.....	94
Список использованных источников.....	96

Введение

Загрузочный портал (манипулятор) – механизм для управления пространственным положением производственных объектов, объектов труда и конструктивных узлов и элементов.

Подвижная часть манипуляторов основана на пространственных механизмах, обладающих большой степенью свободы. Главная задача загрузочного портала является работа в средах, являющимися недоступными, а также опасными для человека (высота, вакуум, радиоактивная среда, отрицательная температура, также другие агрессивные среды). Они также применяются для выполнения вспомогательных работ в производстве разного вида промышленности.

Загрузочные порталы также применяются в медицинской области. Для примера использования манипуляторов в медицинской технике можно отнести протезирование. Для изучения манипуляторов был создан новый раздел теории манипуляторов в теории машин и механизмов. В некоторых узких случаях загрузочный портал можно назвать механической рукой.

Загрузочные порталы состоят из двух видов. Одни управляются человеком, а другие являются автоматизированными. К представителям автоматических манипуляторов можно отнести роботов.

Развитие загрузочных порталов повлияло на создание промышленных роботов. Основные задачи при проектировании механизмов порталов требуют решения таких задач, как выбор правильного соотношения полезных и холостых ходов, создания необходимой маневренности, а также устойчивость при работе. В некоторых случаях требуется проектирование особых систем с возможностью чувствовать усилие со стороны оператора, которое создается на грузозахвате или на рабочем органе.

Для реализации управления для такого сложного механизма необходим промышленный электропривод.

Электропривод осуществляет управление манипулятором. На данное время управление манипулятором за счет электропривода применяется не везде. Большая часть управления применяемых приводов основана на пневматике или на гидравлике. Одна из балансировочных машин в ПАО «АвтоВАЗ» в механо – сборочном производстве цеха 22D20 в корпусе №15-3 имеет гидравлический привод.

Данный станок производит балансировку коленчатых валов. Затем после балансировки осуществляет сверление центральных отверстий через ось вала.

Гидравлический привод в составе балансировочной машины отвечает за управление рукой манипулятора загрузочного портала. Данный привод контролирует вертикальное положение перемещения руки в зону, отвечающую обработки коленчатых валов и их перемещение после завершения операций на следующую операцию.

Гидравлический привод в своем конструктивном исполнении имеет ряд существенных недостатков. Он обладает большими габаритами. Трубопровод занимает большую часть рабочей поверхности, имеет множество трубчатых соединений склонных к протечкам. Также данный привод издает сильный шум насосов соединенных с асинхронными двигателями. Частые протечки соединений и клапанов делают гидравлический привод не экологичным по отношению к окружающей среде. К тому же привод нерационально расходует электроэнергию, требует частого технического обслуживания, что приводит к частым длительным простоям оборудования. Бывают ситуации, когда отсутствуют запасные детали и ремонт затягивает на длительное время, что приводит к убыткам производства. В большинстве случаев длительные простои недопустимы в связи с невозможностью справиться с производством деталей станков дублеров. Описанные выше недостатки гидравлической системы управления, вызывают потребность ее замены на электропривод на базе асинхронного двигателя с микропроцессорной системой управления [1-5,36].

Цель работы: Повышение эффективности работы (увеличение быстродействия, точности, снижение потерь электроэнергии) асинхронного электропривода перемещения портала балансировочной машины.

Задачи исследования.

1. Проработка существующих принципов управления для асинхронного электродвигателя, который обеспечивает работу механизмов при переменной нагрузкой с высокими энергетическими показателями.

2. Разработка и исследование математической модели позиционного асинхронного электропривода перемещения портала.

3. Разработка методики расчета регуляторов системы управления асинхронным электроприводом портала.

Методы исследования.

Теоретическая часть работы представляет собой совокупность методов теории электропривода, теории автоматического управления, электрических машин, пакетов программ, входящих в комплект для моделирования в среде MATLAB и MATLAB – Simulink , а также математического моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением, обладающая низкой стоимостью и обеспечивающей снижение потерь электроэнергии при отработке перемещения портала.

2. Математическая модель системы векторного частотного управления асинхронным двигателем, отличающаяся от известных схем упрощенной схемой наблюдателя.

Новизна магистерской диссертации.

1. Разработана математическая модель и имитационные модели электромеханической системы каретки портального манипулятора с учетом неопределенности параметров и действия

2. Создана методика расчета и оптимизации регуляторов системы управления асинхронным электроприводом

Практическая значимость

1. Созданные математические модели, а также функциональная схема системы с частотно-векторным управлением для асинхронного двигателя в механизмах, которые работают с непостоянной нагрузкой могут применяться для разработки и проведения лабораторных работ в научной деятельности на кафедре «Электрооборудование автомобилей и электромеханика»..

2. Созданная математическая модель для моделирования работы портального манипулятора позволяет осуществлять расчеты для проведения модернизации электроприводов, которые используются в портальных манипуляторах.

Публикации.

При написании диссертации были написаны и опубликованы 2 научные статьи.

1. Коржев В.П. Исследование и показатели качества асинхронного электропривода портала балансировочной машины.

2. Коржев В.П., Рузанов А.Н. Бородин О.А. Экспериментальные исследования статических и динамических характеристик асинхронного частотного электропривода.

Структура и объем магистерской диссертации.

Магистерская работа состоит из введения, трех основных глав, заключения библиографического списка, включающего 37 наименований. Основная часть работы представлена на 92 страницах машинописного текста. Работа содержит 1 таблицу и 29 рисунков.

Глава 1 Исследование влияния изменения параметров и действия возмущений на эффективность работы привода портала балансировочной машины

1.1 Описание технологического процесса перемещения портала. Особенности кинематической схемы привода портала балансировочной машины

Порядок технологического процесса работы балансировочной машины представлен следующим образом.

После завершения предыдущей операции заготовка коленвала зажимается с 2 – х сторон специальными торцами грузозахватного механизма. Затем при помощи портала происходит перемещение заготовки на специальную площадку перед балансировочной машиной, так называемое входное устройство. Далее происходит перемещение заготовки порталом в измерительную станцию.

Сама измерительная станция построена в виде механической клетки. Внутри нее находятся контр – опоры, на которые кладется, а затем фиксируется зажимами заготовка. Для предотвращения случайного разжима зажимов их фиксируют при помощи специальных предохранительных устройств.

Скорость вращения клетки во время определения дисбаланса примерно составляет 400 об/мин. Сама клетка закреплена на специальных торсионных пружинах в четырех положениях, представляющие собой вибромост. При вращении происходят колебания клетки, которые фиксируются двумя вибродатчиками, находящимися на вибромосте со стороны переднего конца коленвала и со стороны фланца. Угол нахождения дисбаланса определяется при помощи фазового датчика. Перед процедурой измерения дисбаланса с помощью датчиков описанных ранее, выставляется клетка в нулевое положение. Затем происходит зажим вала в клетке, приводятся в движение 4 шаговых двигателя. Данные двигатели перемещают контр – опоры клетки соответственно по составляющим V1, V2, H1, H2, которые начинают вращаться и с помощью специальных эксцентриков перемещают ко-

ленвал таким образом, что бы ось инерции коленвала совпадала с механической осью клетки. При данных условиях вибрация вала сведена к минимуму. Данные дисбаланса коленвала отображаются на специальном мониторе в виде 4 – х графиков. При условии что вал выведен, показания всех 4 – х графиков равны 0. После завершения измерения дисбаланса коленвала вибромост блокируется, также дополнительно при помощи дополнительного прикладного зажимается сам вал. Это способствует устойчивому положению вала в клетке. Затем при помощи сверлильных головок вал засверливается с торцов. Получившиеся отверстия являются базовыми для следующей токарной, фрезерной и шлифовальной обработок заготовки коленвала. Это позволяет сбазировать коленвал по его весовым характеристикам, а не по геометрическим, что позволит исключить любую вибрацию при вращении коленвала в работающем двигателе. Затем происходит разжим зажимов и коленвал освобождается. Далее отбалансированный коленвал зажимается с 2 – х сторон специальными торцами грузозахватного механизма и через портал перемещается на следующую операцию.

Вибромост, прикладные приспособления, зажимные пружины, фиксирующее устройство, предохранительные устройства клетки приводятся в действие специальными пневмо – клапанами фирмы Festo, которые управляются при помощи гидростанции при давлении 5 атмосфер.

Вращение клетки осуществляется при помощи вентильного двигателя, которым управляется частотным преобразователем частоты Simondrive Vector.

Частотный преобразователь Simovert P1204 отвечает за вращение асинхронным двигателем сверлильных головок

Грузозахватного механизма и сам портал управляются при помощи серводвигателей с преобразователем Sinumeric.

Перемещение детали в зону обработки с одной операции после обработки на другую осуществляется при помощи транспортного устройства. Данное устройство называется загрузочным порталом. Загрузочный портал состоит из двух уз-

лов. 1 – узел горизонтального позиционирования, который отвечает за перемещение грузозахватного механизма вперед – назад вдоль длины портала. 2 – узел вертикального позиционирования, который осуществляет перемещение грузозахватного механизма вверх – вниз. Приводной двигатель управляется частотным преобразователем Sinumeric. Параметры двигателей на все стадии операции сохранены в памяти блока управления. В блоке хранятся параметры скорости перемещения в каждой точке, время разгона и торможения, а также ток двигателя, и другие параметры. Контроль за положением двигателя на любой стадии операции происходит за счет использования инкрементных датчиков, которые находятся на валу у каждого двигателя.

Диапазон перемещения портала составляет 6000 мм по горизонтальной оси и 1000 мм по вертикальной оси. На специальный разъем модуля управления приходит с инкрементного датчика шесть сигналов. 2 из них определяют скорость вращения двигателя от начальной точки до заданной, а четыре оставшихся показывают положение ротора двигателя внутри одного оборота.

За выбор режима работы двигателя в определенный период времени отвечает выходные сигналы контроллера S7 - 315. Выходные сигналы с контроллера поступают на специальные цифровые входы разъема модуля управления. Ответные сигналы от преобразователя частоты поступают на входы контроллера, которые контролирует выполнение команд, поступающих на цифровые входы.

За передачу вращающего момента от двигателя на портал отвечает передаточный редуктор. Передаточное число редуктора $I = 6$. Сам редуктор соединен с рейкой за счет зубчатой передачи, при помощи которой происходит передвижение грузозахватного механизма по portalу.

На рисунке 1.1 представлена циклограмма работы центровой балансирующей машины.

№	Процесс	Дли таб лицы с.т.в. (с)	Прототип		Смещение, (с)	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5
			V1	V2												
1	Замена детали															
2	Запуск завообразовательн ого механизма	1				■										
3	перемещение коленчатого вала на сторону фланца	0,5				■										
4	загрузка через портал (направление от вилки)	6				■	■									
5	снятие зажима с коленчатого вала	0,5	4					■								
6	сдвиг к стороне фланца	0,5	5					■								
7	продольное выравнивание захвата коленчатого вала	0	6													
8	поперечное выравнивание захвата коленчатого вала	0	7													
9	закрывание закримного рычага	1	8					■								
10	– продольное выравнивание захвата коленчатого вала на/по	0,5	9					■								
11	поперечное выравнивание захвата коленчатого вала	0,5	9					■								
12	выключение механизма выравнивателей	0	11													
13	снятие блокировки	0,8	12					■								
14	увеличение частоты вращения при балансировке	3,5	13					■	■							
15	измерение	4,5	14					■	■	■						
16	замедление и ввинчивание	4	15					■	■	■	■					
17	блокировка	0,8	16					■								
18	размыкание закримного рычага	1	17												■	
19	извлечение порталом погрузки коленчатого вала	1	18												■	
20	перемещение порталом погрузки коленчатого вала	1	19												■	
21	доставка нового коленчатого вала в станцию сверления	1	20													■

Рисунок 1.1 – Циклограмма работы балансировочной машины

Время всего цикла составляет – 26,1 с. Количество операций за весь цикл – 21. Операции: 1 – замена детали; 2 – запуск зевобразовательного механизма, продолжительность этой операции – 1 с; 3 – перемещение коленчатого вала на сторону фланца, продолжительность этой операции – 0,5 с; 4 – загрузка через портал (направление от вилки), продолжительность этой операции – 6 с; 5 – снятие зажима с коленчатого вала, продолжительность этой операции – 0,5 с; 6 – сдвиг к стороне фланца, продолжительность той операции – 0,5 с; 7 – продольное выравнивание захвата коленчатого вала к, продолжительность этой операции – 0 с; 8 – поперечное выравнивание захвата коленчатого вала к, продолжительность этой операции – 0 с; 9 – замыкание зажимного рычага, продолжительность этой операции – 1 с; 10 – продольное выравнивание захвата коленчатого вала на/по, продолжительность этой операции – 0,5 с; 11 – поперечное выравнивание захвата коленчатого вала на/по, продолжительность этой операции – 0,5 с; 12 – выключение механизма выравнивателей, продолжительность этой операции – 0 с; 9 – замыкание зажимного рычага, продолжительность этой операции – 1 с; 10 – продольное выравнивание захвата коленчатого вала на/по, продолжительность этой операции – 0,5 с; 9 – замыкание зажимного рычага, продолжительность этой операции – 1 с; 10 – продольное выравнивание захвата коленчатого вала на/по, продолжительность этой операции – 0,5 с; 11 – поперечное выравнивание захвата коленчатого вала на/по, продолжительность этой операции – 0,5 с; 12 – выключение механизма выравнивателей, продолжительность этой операции – 0 с; 13 – снятие блокировки, продолжительность этой операции – 0,8 с; 14 – увеличение частоты вращения при балансировке, продолжительность этой операции – 3,5 с; 15 – измерение, продолжительность этой операции – 4,5 с; 16 – замедление и ввинчивание, продолжительность этой операции – 4 с; 17 – блокировка (поставить блокировку), продолжительность этой операции – 0,8 с; 18 – размыкание зажимного рычага, продолжительность этой операции – 1 с; 19 – извлечение порталом погрузки коленчатого вала, продолжительность этой операции – 1 с; 20 – перемещение порталом погруз-

ки коленчатого вала, продолжительность этой операции – 1 с; 21 – доставка нового коленчатого вала в станцию сверления, продолжительность этой операции – 1с [4,6-9].

Как уже отмечалось ранее, двигатель соединяется с приводным редуктором.

На рисунке 1.2 представлено изображение редуктора, при помощи которого от двигателя передаётся вращательный момент для передвижения грузозахватного механизма.

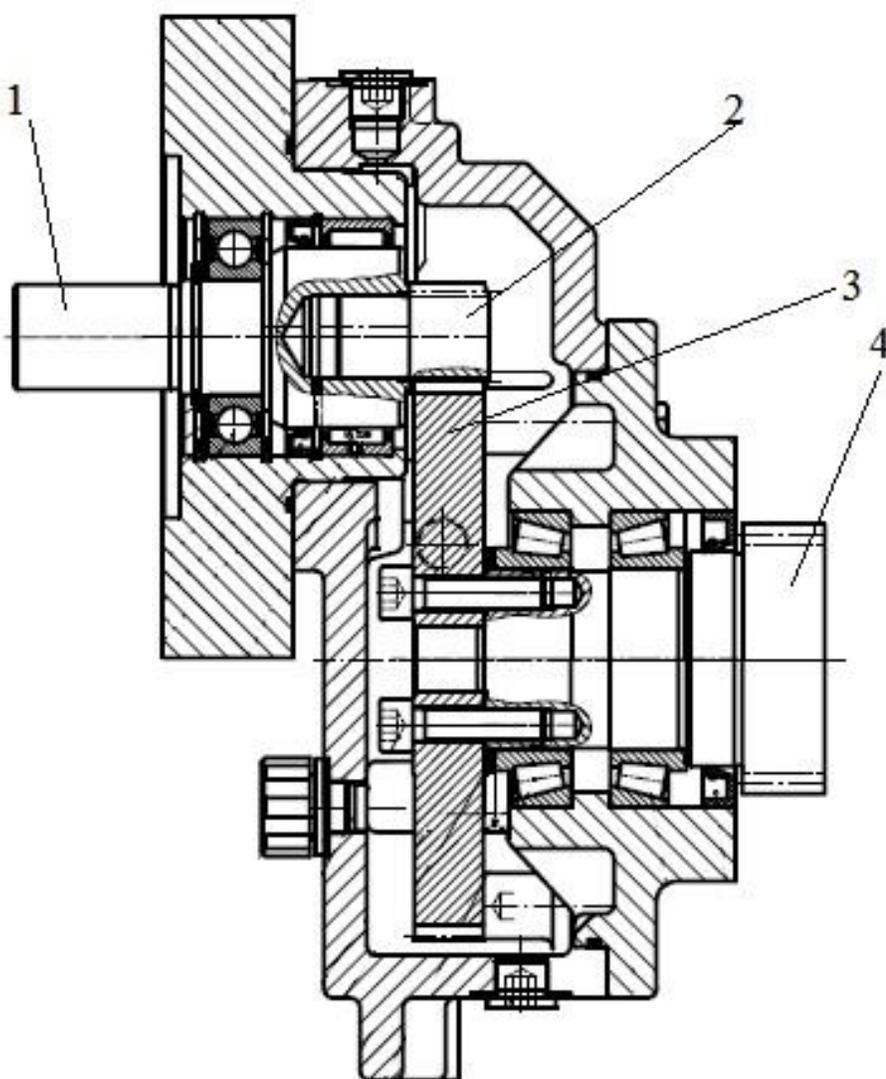


Рисунок 1.2 – Приводной редуктор

Через специальную муфту вал приводного двигателя соединяется с входным валом 1 редуктора. При вращении конец 2 вала редуктора вращается и при помощи зубчатого соединения передаёт вращение на зубчатое колесо 3. Зубчатое колесо 3 в свою очередь вращает ведущее зубчатое колесо 4.

Технические данные механизма – двигатель с редуктором:

- 1) Передаточное отношение редуктора $I = 6:1$;
- 2) Диаметр ведущего колеса – $d_0 = 76$ мм;
- 3) 1 оборот колеса – 238 мм;
- 4) Модуль – $M = 3$;
- 5) Подвижная масса – 420 кг;
- 6) Сопротивление движению – 1000 Н;
- 7) КПД коробки передач – 0,95;
- 8) Частота вращения двигателя – макс. – 3000 мин^{-1} ,
Вход. – 3000 мин^{-1} ;
- 9) Частота вращения ведомого вала – макс. – 500 мин^{-1} ,
Вход. – 500 мин^{-1} ;
- 10) Ход за оборот датчика – 39,68 мм;
- 11) Импульс за оборот датчика – 2048 импульс/оборотов, Х4096 обороты;
- 12) Скорость вращения оси двигателя – 2м/сек;
- 13) Ускорение вращения оси двигателя – 4м/сек^2 ;
- 14) Монтажное исполнение двигателя – IM3081;
- 15) Степень защиты двигателя – IP54.

1.2 Основные требования, предъявляемые к приводу портала балансирующей машины

Электропривод отвечает за приведение в движение исполнительных механизмов рабочих машин, а также управления этим движением для целей осуществления технологического процесса.

В настоящее время под современным электроприводом подразумевается совокупность силового преобразователя частоты, электромеханического преобразователя энергии (двигателя), а также устройства управления. Современный электропривод отвечает за преобразование энергии из электрической в механическую с заданным алгоритмом работы технологической установки. Главным основным требованием для приводного двигателя для предания движения рабочим механизмам является обеспечение требуемой производительности механизма при надлежащей надежности, а также экономичности при работе. Описанное выше требование осуществимо лишь при том, что выполнено правильный выбор двигателя соответствующей мощности.

Основные параметры, по которым происходит выбор двигателя:

- 1) Род тока;
- 2) Частота вращения вала двигателя;
- 3) Выходная мощность;
- 4) Значение и характер нагрузки.
- 5) Условия окружающей среды на месте работы двигателя.

В современном мире сфера электрического привода в промышленной отрасли, а также в транспорте и в быту занимает все большее положение по зоне использования. Необходимо отметить, что для осуществления энергосбережения, использование электропривода для управления производственными процессами является наиболее рациональным. При бурном росте промышленности, автоматизированный электропривод имеет

возрастающее значение, как энергетическая основа для создания автоматизированных производственных процессов.

На данный момент электропривод – основной потребитель электрической энергии. Сегодня уже более 70% всей электроэнергии, которая вырабатывается в современном мире уходит на потребление электрическими двигателями.

Из описанного выше следует, что эффективность энергосберегающих технологий в большей степени определяется от эффективности электропривода. Проблемы, связанные с рациональным и экономичным расходованием электроэнергии являются основными и требуют к себе особое внимание по их решению. Проектирование компактных, высокопроизводительных, а также экономических систем электропривода – основное приоритетное направление развития в технике сегодняшнего и завтрашнего дня. Описанная выше проблема требует серьезного подхода к проведению исследований, а также к разработке соответствующих мероприятий, которые направлены на повышение коэффициента полезного действия (КПД) электроприводов. Также следует уделить проработке организации управления технологическими машинами, для большего снижения затрачиваемой ими электрической энергии.

Одной из важных особенностей электропривода на этапе его развития, является расширение сферы его применения за счет качественного и количественного роста регулируемых электроприводов переменного тока с частотным управлением. За последнее десятилетие конца двадцатого века ознаменовалось значительными успехами в силовой электронике. Произошло бурное освоение биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), технологический процесс производства силовых модулей, на их основе (целые инверторы и стойки). Также улучшению подверглись и силовые интеллектуальные модули (IPM) со встроенными средствами защиты ключей, а также интерфейсами с непосредственным подключением к системам с микропроцессорным управлением.

С ростом уровня микропроцессорной технике и ее интеграции, а также с переходом от систем с микропроцессорами к системам с микроконтроллерами со встроенным набором специальных периферийных устройств, наблюдается невозможность массовой замены систем управления на базе аналоговых устройств на системы с прямым цифровым управлением.

После анализа продукции ведущих мировых производителей систем электроприводов, а также материалов, в которых опубликованы научные исследования в данной области, можно сделать вывод, что идет неуклонное замещение систем электроприводов на базе постоянного тока, на электропривода на базе переменного тока. Данная замена электроприводов связана с низкой механической надежностью с щеточно-коллекторного узла, а также высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока по отношению к двигателям переменного тока. Специалисты после анализа прогнозов относительно электроприводов постоянного тока сделали вывод, что их доля в ближайшие десять лет сократится до 10%.

В настоящее время широкое распространение получили электропривода с асинхронными короткозамкнутым двигателем переменного тока. Большая часть таких приводов нерегулируемые и составляет примерно 80%. Доля частотно – регулируемых асинхронных электроприводов быстро увеличивается. Это связано с быстрым снижением цен на статические преобразователи частоты.

Также одна из важных особенностей в развитии современных электроприводов – повышенные требования к статическим, а также динамическим показателям. Усложнение управления технологическими установками и процессами повлияло на возможности электроприводов расширения и функционал. Путь развития электроприводов направлен на создания систем с числовым программным управлением и расширением используемых средств современной микропроцессорной техники. Большинство массово используемых электроприводов (вентиляторы, конвейеры, насосы, компрессоры и т.д.) для своего функционала имеют относительно малый диапазон регулирования скорости (1:10, 1:20), а также малое быст-

родействие. В таких случаях разумно применять классическую структуру скалярную структуру управления. Широкодиапазонные (до 1:10000), быстродействующие структуры в электроприводах станков, транспортных средств и роботов требуют использование усложненных структур на основе векторного управления. Доля приводов с частотно – векторным управлением в настоящее время занимает примерно 5% от общего числа и безостановочно растет.

В последние годы на базе систем с векторным управлением разработан обширный ряд электроприводов с прямым цифровым управлением момента. Одна из отличительных особенностей данных решений – предельно высокое быстродействие контуров тока, основанных, как правило, на базе релейных цифровых регуляторов или на базе нечеткой логики (фаззи – логики). Системы с прямым цифровым управлением моментом предназначены для использования для транспорта, лифтов, робототехнике, кранах.

Изучая развитие современных электроприводов нужно учитывать, что объективная тенденция совершенствования электротехнического оборудования – это его усложнение, вызванное повышенными требованиями технологических процессов и расширением потребительских свойств электротехнических изделий. В связи с данными условиями основная задача в развитии электропривода, а также средств, для его управления – стремление к полному удовлетворению требований автоматизации механизмов, технологических линий и рабочих машин в том числе. Стоит учитывать что данные возможности, описанные выше могут быть реализованы при внедрении современных электроприводов с регулировкой, основанной на микропроцессорном управлении. На данный момент главная задача – увеличение количества областей, затронутых использованием регулируемых электроприводов переменного тока. Успех в решении поставленной выше задачи сможет обеспечить энерговооруженность труда, автоматизировать, а также механизировать большинство технологических установок и процессов, что существенно повысит производительность труда. Для реализации необходимо разработать мето-

дику решения ряда производственных, а также научно-технических проблем в сфере электроники из-за высоких требований регулируемых электроприводов к элементам механических передач, полупроводниковых силовых преобразователей, микроконтроллеров, а также электрических двигателей.

Серьезный подход к комплексному решению вопросов о совершенствовании современных электроприводов, а также электромеханических комплексов на их основе выдвигают особое внимание не только к проектированию, но и реализации механических преобразователей движения. В данное время наблюдается тенденция к упразднению механических устройств технологического оборудования и усложнению электротехнических компонентов. На данное время наблюдается углубление интеграции электромеханического преобразователя (электродвигателя) с рабочим органом, а также устройствами для их управления. Эта тенденция затрагивает не только отечественную, но и зарубежную практики. В качестве примера можно привести мотор-колесо, приводимое в движение тяговым электроприводом; электропривод, установленный в шлифовальных станках; исполнительный орган в координатном построителе с двух координатным (X,Y) двигателем.

На данный момент в настоящее время приоритетным современным является электроприводов, в основе которого лежит асинхронный электропривод управляемый цифровым управлением на основе микропроцессорной технологической базе. Данное решение позволяет создавать комплексный регулируемый электропривод с реализацией в нем блочно – модульного принципа и применения современной микроэлектроники. Дальнейшая реализация данного решение способствует процессу совершенствованию, а также развитию комплексных электроприводов с использованием систем частотного управления на базе электродвигателей переменного тока. Входа, а также выхода описанных выше приводов интуитивно просто согласуются с входами и выходами современных автоматических систем, отвечающих за управления технологическими процессами (АСУ ТП), благодаря чему данные электропривода получили широкое распространение в сфере управле-

ния технологическим оборудованием. Применение асинхронного электропривода с цифровым управлением способствует простоте конструкции, экономичности, а также высокой надежности.

После того как будет проведена модернизация привода, произойдут улучшения показателей как с технической стороны, так и с экономической на всем периоде работы балансировочной машины. По своим габаритам асинхронный электропривод занимает меньше места по сравнению с гидравлическим. К тому же электропривод практически бесшумен. В связи с изменением типа привода исключаются гидравлические цилиндры, лопастные насосы. Также происходит упрощение ремонта новой системы. Электропривод безопасен и не загрязняет окружающую среду, способен экономить электрическую энергию в связи остановками при рабочем цикле, повышает КПД. После того, как асинхронный электропривод будет установлен, его дальнейшая настройка происходит оператором с пульта управления. Это позволяет исключить потребность периодической настройки и регулирования действия клапанов.

1.3 Анализ влияния изменения параметров электродвигателя и механической части на эффективность работы привода портала балансировочной машины

Доля асинхронных электродвигателей от общего числа всех достигает более 90% от всех других электродвигателей. Их распространение обусловлено простотой конструкции и практическое отсутствие деталей конструкций, способствующие поломкам.

Но есть и у описанных выше двигателей большие недостатки: малый момент пуска, завышенный ток при пуске, отсутствие между валом привода с механической нагрузкой согласованности механического момента. Это вызывает избыточные нагрузки, а также резкое увеличение тока. Также при снижении нагрузки на валу асинхронного электродвигателя наблюдается сильное снижение КПД.

Основные факторы, влияющие на КПД асинхронного двигателя: конструкция, модель, степень загрузки по отношению к номинальной, износ, перемотка обмотки статора после ремонта.

Для повышения КПД при ненормальном режиме работы асинхронного двигателя применяется регулируемый электропривод. Он позволяет обеспечивать стабильную эффективность в работе при нагрузке, которая достигает на всем диапазоне частот вращения не менее 75%. Также он позволяет значительно увеличить коэффициент мощности, а также регулировать частоту питающей сети и напряжение.

Преобразователь частоты входящий в состав электропривода управляет асинхронным электроприводом за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Из – за разной реализации ШИМ, двигатель подвержен воздействию основных гармоник, что плохо может вызвать увеличение потерь, повышение температуры, уровень вибрации и шум, а также саму эффективность.

Также при изменении скорости асинхронного двигателя стоит учитывать, что потери в двигателе состоят в основном из механических(P_m) и тепловых(P_T). Механические потери – трение подшипников, кривизна вала и другие. Тепловые потери – нагрев обмоток, вызванный протеканием тока через них. Потери в железе зависят от частоты питающего напряжения, а тепловые потери пропорциональны квадрату тока. При регулировании двигателя на низких оборотах преобладают механические потери, отсюда наблюдается снижение КПД. Это вызвано снижением выходной мощности.

Асинхронные двигатели, питаемые от преобразователя частоты склонны к большему нагреву, чем от питания от сети на прямую. Особенно это связано с поддержанием необходимого момента на высоких оборотах или при низких оборотах, когда скорость вращения лопастей вентилятора охлаждения недостаточно. Данное повышение нагрева вызвано высокочастотными составляющими напряже-

ния создаваемое ШИМ. Эти составляющие никак не влияют на создающийся момент в двигателе из-за магнитного потока, который создается в воздушном зазоре и вращается с синхронной скоростью. Для того, чтобы сохранить температуру рабочего двигателя в норме, электропривод уменьшает момент на валу двигателя, следя за показателями температуры обмоток, а также за магнитным потоком.

При пуске двигателя от преобразователя частоты, электропривод ограничивает пусковой ток в пределах 140-150% от номинального значения, при поддержании не более 150% от номинального тока. Это позволяет реализовать частые пуски при отсутствии перегрева и увеличить срок службы двигателя.

Регулируемый электропривод может оказывать негативное влияние на изоляцию обмоток двигателя. Это проявляется высокой частотой коммутации IGBT транзисторов, которые применяются в современной технике. Одними из негативных эффектов являются появление пиков перенапряжения, увеличение производной по времени от напряжения, а также увеличение электромагнитного излучения.

Также одним из основных факторов, влияющих на точность работы электропривода, является техническое состояние механической части. В данном случае под механической составляющей подразумевается шестерни, входящие в состав механического редуктора, зубчатая рейка, а также соединительная муфта.

Из-за сильного износа составляющих механического редуктора или зубцов рейки возможно проскальзывания в зацеплении между ними. Также проскальзывания могут проявляться при не четком закреплении передаточной муфты на валу двигателя или на валу передаточного редуктора. Это может вызвать негативное влияние на точность позиционирования системы. Электропривод, работая по программе, будет думать, что система была выставлена в рабочее положение и продолжит работу по циклу, что может привести к механическим поломка оборудования.

1.4 Выводы

После анализа технологического процесса работы портала балансировочной машины, изучения основных требований предъявляемых к электроприводу к данной установке, а также учета изменения параметров на точность и быстроту работы можно сделать выводы:

1. Технологический процесс балансировки можно улучшить, сократив последовательность действий в цикле и оптимизации регулирования настроек за счет установки дополнительных датчиков и использования контроллеров фирмы SIMENS. Это немного усложнит конструкцию балансировочной машины, но увеличит количество обрабатываемых деталей за смену.

2. Использование электропривода позволит ускорить цикл обработки детали, улучшить эффективность использования электроэнергии, увеличит диапазон регулирования скорости портала, позволит добиться плавности работы, уменьшит время разгона и торможения, упростит ремонт станка, а также уменьшит время простоя, вызванное ремонтом оборудования по отношению к гидроприводу. Уменьшит себестоимость готовой продукции.

3. Использование асинхронного электропривода требует установки коробов, гибких рукавов, защитных кожухов для защиты прокладываемых кабелей питания и управления.

Глава 2. Разработка математического описания и моделей системы с асинхронным двигателем портала балансировочной машины

2.1 Структурная схема позиционной системы с асинхронным двигателем портала балансировочной машины

На данной схеме асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором M показан в виде развернутой структурной схеме (рисунок 2.1). Так же на ней учтены все обратные связи. Для разделения каналов, отвечающих за регулирование скорости и модуля потокосцепления ротора, была введена компенсация, за счет введения специальных сигналов коррекции f_1 , f_2 , а также f_3 . Введенный сигнал коррекции f_1 отвечает за компенсацию внутренней связи e_{T1} от влияния воздействия. Сигнал f_2 применяется для компенсации влияния внутренней связи e_{T2} , а сигнал f_3 обеспечивает компенсацию влияния ЭДС вращения e_{ω} асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В канале регулирования модуля потокосцепления ротора $|\psi|$, а также его стабилизации состоит из внешнего и внутреннего контура. Внутренний контур подчинен внешнему. Внутренний контур предназначен для управления намагничивающей составляющей тока статора i_{s1} , содержит датчик тока UA , а также регулятор тока $AA1$. Внешний контур отвечает за управления и регулировку потокосцепления. Во внешнем контуре расположился регулятор потокосцепления $A\psi$ и датчик потокосцепления $U\psi$.

Канал для управления скоростью вращения асинхронного двигателя состоит из внутреннего и внешнего контура. Внутренний контур подчинен внешнему. Внутренний контур отвечает за регулировку квадратурной составляющей тока статора i_{s2} . В нем находятся регулятор тока $AA2$, а также датчик тока UA . Внешний контур отвечает за регулировку скорости вращения асинхронного двигателя. В нем находятся датчик скорости BR (тахогенератор) и регулятор скорости AR .

Для того, чтобы упростить схемы развязки контуров представленных на структурной схеме, можно заменить пропорциональный вектор скорости вращения $\omega_{\text{вр}}$ потокосцепления ротора на сигнал пропорциональный $p_{\text{П}\omega}$.

В качестве организации управления асинхронным электродвигателем

Для питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором был выбран один из серийных преобразователей частоты фирмы Siemens типа Sinumeric S120 с частотно – векторным управлением. Номер типа 6SE64-24-9FB50 [13,25].

Данный электропривод обладает следующими характеристиками:

Наибольшая величина выходного тока – 6,4 А;

Максимальная питаемая мощность двигателя – 3 кВт;

Наибольший выходной ток при длительном времени – 6,1 А;

Величина входного тока (макс.) – 11,9 А;

Входное напряжение – 380 – 600 В \pm 15 % 3 фазы;

Минимальное рекомендуемое сечение входного кабеля – вход – 2 мм²;

- выход – 1,5 мм²;

Габаритные размеры – 160 × 190 × 180мм;

Номинал рекомендуемого предохранителя – 20 А;

Время работы при перегрузки в 150% в течение 60 с;

Масса преобразователя – 2,4 кг;

Минимальное и максимальное значение входной частоты составляет 47-63 Гц;

Коэффициент мощности – $\geq 0,7$;

Диапазон выходной частоты – от 0 до 700 Гц;

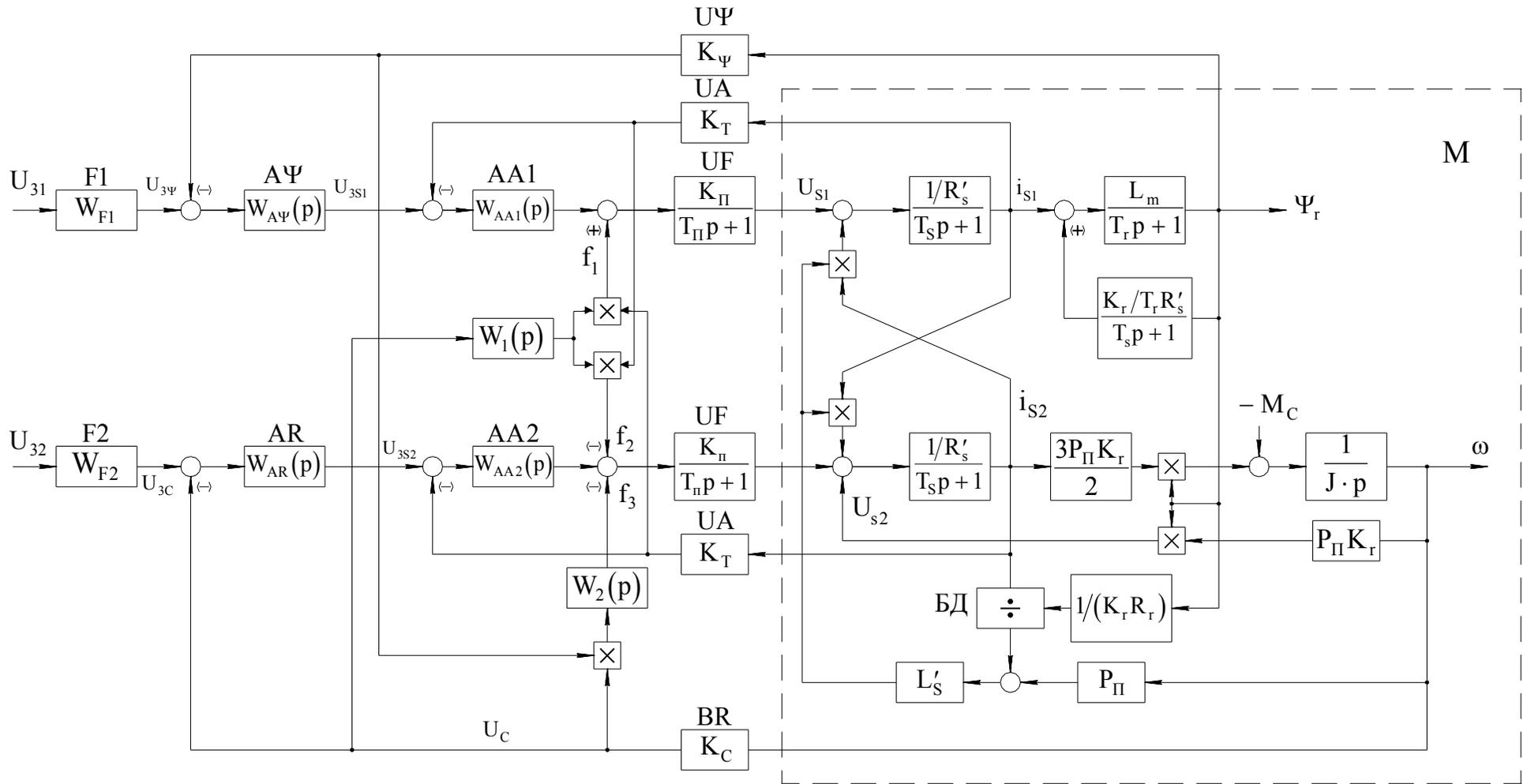


Рисунок 2.1- Структурная схема асинхронного электропривода

Встроенная защита перегрева инвертора, недогрузок, а также перегрузок по напряжению;

Дополнительно встроена защита против неполадок при потере заземления, короткого замыкания, а также работы без нагрузки;

Присутствует возможность 4х квадратурного режима работы без рекуперации энергии в сеть.

Возможность организовать бесконтактного векторного управления, а также обеспечение его регулировки в зависимости от напряжения и частоты;

Наличие аналоговых однополярных входов/выходов PID с рабочим напряжением 2-10В, с номинальным током 4-20мА и биполярных входов/выходов с напряжением -10...+10В и током 4-20мА;

Аналоговая установка частоты – 10 бит;

Наличие аналоговых выходов при токе 0-20мА до 500Ом и обеспечение стабильности 5%

Отклонения от установленной частоты: аналоговая <1%, а цифровой < 0,02%

Возможность температурного контроля двигателя за счет входа РТС, управления I^2t ;

Установка времени разгона и замедления от 0 до 650с;

Наличие управляемых выходов 2 реле 230 В переменного тока нагрузкой до 0,8А и 2А;

Возможность подключения через RS485, RJ45, RJ50.

Высокий коэффициент полезного действия КПД инвертора – 97%;

Диапазон рабочей температуры составляет от 0°С до 50°С при влажности воздуха не более 90% без конденсации;

Степень защиты – IP 21;

Наличие двойной изоляции. Возможность использования защитного экранирования;

В Sinumeric S120 входит в семейство преобразователей специально разработанных для запитывания от сетевого источника питания. В своем корпусе

данные преобразователи несут все необходимые компоненты, которые нужны для их полной функциональности. Модельный ряд описанных выше преобразователей включает различные варианты исполнения в зависимости от выходной мощности, уровня требований к функциональным возможностям, а также от номинального сетевого напряжения. В привод серии Sinumeric S120 изначально было заложена низкая себестоимость, а также простота применений. Серия Sinumeric включает в себя три основных типоразмера, и имеют степень защиты IP 21.

Высокие динамические характеристики, а также функциональные возможности Sinumeric обеспечиваются за счет использования без сенсорного управления, интеллектуальными силовыми модулями, а также применения векторного управления без сенсоров. Это позволяет повысить перегрузочную устойчивость. Внутри преобразователя находится полностью интегрированные силовые модули, состоящие из IGBT транзисторов. Силовые модули установлены на теплоотводах, которые обеспечивают эффективность охлаждения и продуваются вентиляторами, которые управляются через заданную программу в контроллере. За счет эффективного рассеивания тепла, силовые модули позволяют избежать уменьшения номинальной мощности при температуре окружающей среды достигающей 50°C. Сам преобразователь частоты включают в себя неуправляемый выпрямитель входного сетевого напряжения, инвертора собранного на IGBT модулях, а также наличие в звене постоянного напряжения конденсатора. Для уменьшения пускового тока при подключении блока к сетевому напряжению, осуществляется предварительная зарядка звена постоянного тока DC через реле предварительной зарядки и резисторы. Выпрямленное напряжение после диодного моста поступает в IGBT модули и преобразуется в импульсное напряжение переменной частоты. Использование транзисторных IGBT модулей последнего поколения обладают низкими потерями и полной поддержкой оптимизированного ШИМ(широтно-импульсной модуляции).

Если использовать оптимизированный ШИМ, то можно получить определенные преимущества, а именно:

- Малые потери при преобразовании электроэнергии не только в преобразователе, но и в двигателе.
- Возможность использовать широкого диапазона частот для двигателя от 0 до 700 Гц.
- Прикладывать к двигателю широкий диапазон напряжения от 0 до 650В.
- Переменные токи двигателя максимально приближенные к синусоидальным.
- Увеличение КПД двигателя.
- Практический полное отсутствие шума при работе двигателя при работе на высокой частоте переключения до 16 кГц.
- Защита преобразователя от короткого замыкания и замыкания на землю.

При использовании команды OFF преобразователь не отключается от сети. Между сетевым напряжением источника питания и преобразователем для электрической изоляции предусмотрена установка контактора или сетевого выключателя. Для аналогичной защиты можно рассматривать установку электронных предохранителей. Вся серия преобразователей серии Sinumeric имеют функцию непосредственного подключения к подходящему источнику переменного напряжения. Для этого на преобразователе присутствуют специальные промаркированные клеммы. Преобразователи частоты Sinumeric способны работать не только от трехфазного, но и однофазного питающего сетевого напряжения. Диапазон напряжения подключения для трехфазной сети составляет 380-400В, а для одно фазного 220-250В. Также предусмотрена возможность работы преобразователя от двух фаз переменного напряжения с номиналом 208В.

При увеличении частоты переключения ШИМ увеличивается температура охлаждающих радиаторов IGBT инвертора. Это приводит к тому, что увеличиваются внутренние потери в силовых модулях. При превышении температурного порога работы преобразователя, его работа может быть остановлена с сопровождением на дисплее кода ошибки, обозначающим превышение температуры.

Для того, чтобы избежать нежелательную остановку, в SinumericS120 встроена функция автоматического уменьшения частоты переключения ШИМ (например с 12кГц до 5кГц). Благодаря этому происходит уменьшение тепловых потерь на силовых элементах и гарантирует дальнейшую работу без остановки по перегреву. Также при уменьшении окружающей температуры или нагрузки преобразователь может увеличить частоту переключения ШИМ, но при этом он проводит проверку по показаниям сенсоров.

Еще одной встроенной аппаратной функцией преобразователя Sinumeric является циклическое ограничение тока. Аппаратный порог ограничения тока ниже порога при программном прерывании перегрузки по току, зато действует с эффективной быстротой. Это позволяет избежать внезапные прерывания, вызванные требуемыми быстрым ускорением или внезапным приложением нагрузки на вал двигателя.

Все преобразователи серии Sinumeric имеют функцию для непосредственного подключения к незаземленной сети питания. При заколачивании одной из фаз питающего напряжения на двигатель на землю SinumericS120 может прервать свою работу с последующим появлением ошибки о перегрузке по току. Также если несколько фаз при аварийных обстоятельствах или случайно замкнутся на землю, то это приведет к прерыванию работы как из-за перегрузки по току.

Sinumeric является семейством инверторов с наличием промежуточного контура постоянного напряжения для управления двигателями переменного тока. Различный модельный ряд, от компактного Sinumeric S120 мощностью 150 Вт до Sinumeric S120 мощностью до 80 кВт.

Инвертор благодаря векторному управлению без датчиков позволяет определять требуемые значения частоты и входного напряжения для поддержания необходимой скорости вращения двигателя. Это обеспечивает эффективность и улучшенное управление потокосцеплением. Режим бессенсорного векторного управления Sinumeric S120 показан на рисунке 2.2.

3) Присутствие высокого пускового момента, а также высокой точности при регулировании скорости вращения электродвигателя при управлении по вектору;

4)

5) Практически мгновенное ограничение тока для повышения надежности работы без необходимости прерывания на остывание. (FCL);

6) Рабочая температура в диапазоне от 0 до 50 градусов;

7) Наличие встроенного опционального радиочастотного фильтра (RFI) в инверторах при использовании однофазных входов MMV14 – MMV400;

8) Применение пропорционально – интегрального – дифференциального регулятора (ПИД) при управлении процессом с использованием внутренней замкнутой обратной связи. Для обратной связи источник питания способен выдавать 15 и 50В для сигналов для датчиков.

9) Наличие высокого стартового момента с возможностью автоматического повышения начального пускового момента при старте;

10) Наличие возможности пользоваться дистанционным управлением для контроля 32 – мя инверторам при использовании интерфейсов RJ45 и RS 485 по протоколу USS;

11) Большой диапазон доступных параметров для настройки дают широкие возможности сконфигурировать инвертор для любого практического применения;

12) Наличие встроенной памяти для сохранения сконфигурированных настроек параметров. Возможность вернуться в любое время к заводским параметрам при нажатии определенной комбинации клавиш.

13) Наличие 6 способов управления выходной частоты, то есть скоростью двигателя: Аналоговое, цифровое, внешним потенциометром, фиксированными частотами с цифровых входов, функция мотор – потенциометр, а также через последовательный интерфейс.

14) Управление выходной частотой (т.е. скоростью двигателя) может осуществляться одним из шести способов:

- 15) Наличие встроенного тормоза, основанного на постоянном токе.
- 16) Наличие встроенного тормозного ключа для внешнего резистора (MMV);
- 17) Встроенная компенсация для нагрузки за счет контроля и управления потоком сцеплением работающая в автоматическом режиме, а также частотно – векторное управление без датчиков;
- 18) Программированное время при разгоне, а также при торможении и настройка сглаживания;
- 19) Наличие релейных выходов встроенных в привод с возможностью использования 13 функциями;
- 20) Наличие встроенных аналоговых выходов;
- 21) Наличие внешнего разъема с интерфейсом RS485 для возможности подключения дополнительного модуля PROFIBUS или подсоединение расширенного многоязычного операторского пульта (OPM2);
- 22) Возможность запрограммировать установки для двух наборов параметров к двигателю при использовании расширенного операторского пульта (OPM2);
- 23) Автоматическое определение количество пар полюсов двигателя при подключении;
- 24) Наличие охлаждающего вентилятора, управляемого программно через термодатчики;
- 25) Экономия места при размещении инвертора рядом с другими модулями или друг с другом за счет компактных размеров.

2.2 Математическое описание позиционной системы с асинхронным двигателем с учетом изменения параметров и действия возмущений

Для того чтобы произвести математическое описание асинхронных двигателей используют различные виды записи уравнений. Для различных систем координат используется своя форма записи уравнений. Использование различ-

ных форм записей уравнений объясняется тем, что режимы работы асинхронного двигателя, условий решаемой задачи, а также процессы, рассматриваемые в нем, исследуются с различными упрощениями и допущениями при включении в цепь ротора и статора диодов, транзисторов, тиристоров, индуктивно-емкостных элементов [10,14,15 – 18,35].

Асинхронный электродвигатель может работать в симметричном или несимметричном режимах работы. Режим работы двигателя считается определенным, если заданы четыре вектора при несимметричном режиме или три вектора при симметричном. Установленное количество заданных векторов через геометрическое взаимодействие пары векторов позволяет определить переходный электромагнитный момент. На рисунке 2.2 представлены схемы асинхронного двигателя в неподвижной системе.

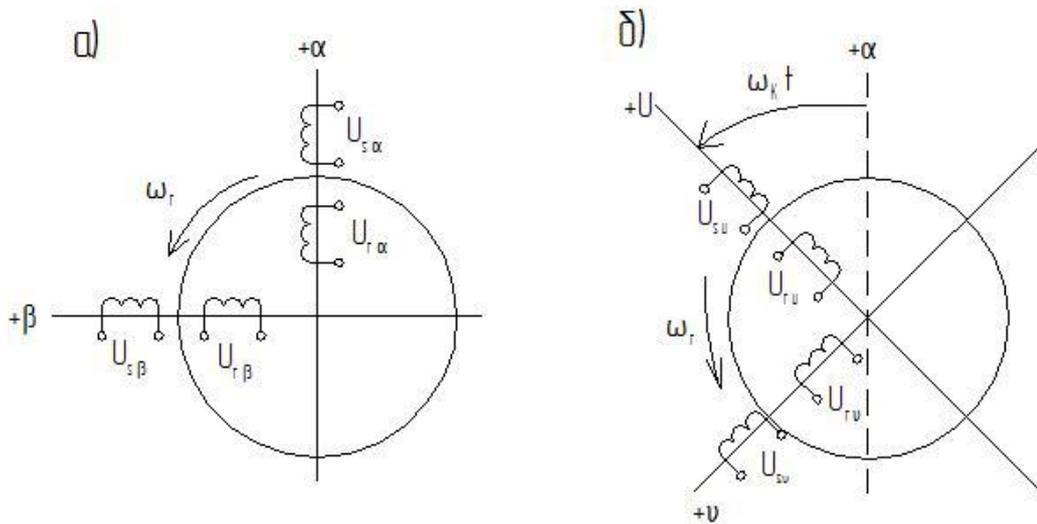


Рисунок 2.2 - Схематичное представление асинхронного двигателя в неподвижной системе (α, β) координат (а) и в подвижной системе (U, ϑ) координат (б)

Составим совокупность вариантов уравнений выражения электромагнитного момента (2.1)

$$\begin{aligned}
\text{Вариант 1: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p L_m I_m (\bar{I}_s \bar{I}_r); \\
\text{Вариант 2: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p I_m (\bar{I}_s \varphi_s^*); \\
\text{Вариант 3: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p I_m (\bar{I}_r \varphi_r^*); \\
\text{Вариант 4: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} I_m (\varphi_s \bar{\varphi}_r); \\
\text{Вариант 5: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p I_m (\bar{I}_s \bar{\varphi}_0^*); \\
\text{Вариант 6: } M_{\Sigma M} &= \frac{3}{2} p L_m (\bar{\varphi}_0 \bar{I}_r^*);
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

В представленной выше совокупности вариантов уравнений φ_s, φ_r – вектора потокосцеплений, а также I_s, I_r – токи статора и ротора. φ_s^*, φ_r^* , а также I_s^*, I_r^* – сопряженные векторы; L_s, L_r , а также L_m индуктивности статора и ротора, а L_m – взаимная индуктивность.

Уравнения, которые описывают электрические состояния ротора и статора, а также уравнения, описывающие моменты на валу, являются основными уравнениями для описания процесса в асинхронном двигателе электромеханического преобразования энергии.

Для уравнений, показывающих зависимость напряжений на статоре в обобщенной машине асинхронного двигателя в системе координат (α, β) , воспользуемся формулой (2.2)

$$\left. \begin{aligned}
\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}; \quad \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -r_r i_{r\alpha} - p\omega_r \psi_{r\beta}; \\
\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - r_s i_{s\beta}; \quad \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -r_r i_{r\beta} + p\omega_r \psi_{r\alpha};
\end{aligned} \right\} \tag{2.2}$$

Для расчета взаимосвязи потокосцеплений, выраженных через токи ротора, а также статора показана через систему уравнений, воспользуемся формулой (2.3)

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \quad \psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \tag{2.3}$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta};$$

Для простоты математической модели, а также удобства ее построения, систему состоящую из уравнений (2.3) можно представить через уравнения токов, воспользовавшись формулой (2.4)

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{1}{L'_s} \psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{L'_s} \psi_{r\alpha}; i_{r\alpha} = -\frac{k_s}{L'_r} \psi_{s\alpha} + \frac{1}{L'_r} \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{L'_s} \psi_{s\beta} - \frac{k_r}{L'_s} \psi_{r\beta}; i_{r\beta} = -\frac{k_s}{L'_r} \psi_{s\beta} + \frac{1}{L'_r} \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где $L'_s = \sigma L_s$, $L'_r = \sigma L_r$, $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ и $k_s = \frac{L_m}{L_s}$ – соответственно связи ротора и статора; $\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) = (1 - k_s k_r)$ – коэффициент рассеяния.

Воспользуемся формулой (2.5) для нахождения уравнения электромагнитного потока в скалярном виде

$$M_\varepsilon = \frac{3}{2} p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) . \quad (2.5)$$

В одномассовой системе для двигателя уравнение, описывающее движение воспользуемся формулой (2.6)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} (M_\varepsilon - M_c), \quad (2.6)$$

Где J_Σ – суммарный момент инерции, который приведен к валу двигателя; M_c – статический момент нагрузки механизма.

Представленные выше уравнения (2.2) – (2.6) являются наиболее общими, а также получили широкое распространение. Это связано с тем, что они позволяют определить, как ведут себя потокосцепления, а также токи в асинхронном двигателе.

В уравнениях (2.2) и (2.5) есть возможность исключить токи ротора и статора, если выразить их через потокосцепления, воспользовавшись совокупностью формул (2.7). Отсутствие в системе уравнений (2.7) токов ротора и статора в явном виде, делает целесообразно применять данную систему уравнение для исследований механических характеристик в асинхронном двигателе.

$$\begin{aligned}
\frac{\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - \frac{r_s}{L'_s} \psi_{s\alpha} + \frac{k_r r_s}{L'_s} \psi_{r\alpha} ; \\
\frac{\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - \frac{r_s}{L'_s} \psi_{s\beta} + \frac{k_r r_s}{L'_s} \psi_{r\beta} ; \\
\frac{\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{k_s r_r}{L'_r} \psi_{s\alpha} - \frac{r_r}{L'_r} \psi_{r\alpha} - p \omega_r \psi_{s\beta} ; \\
\frac{\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{k_s r_r}{L'_r} \psi_{s\beta} - \frac{r_r}{L'_r} \psi_{r\beta} - p \omega_r \psi_{s\alpha} ; \\
M_{\text{э}} &= \frac{3}{2} p \frac{k_r}{L'_s} (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta}) .
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

Если целью изучения переходных процессов в асинхронном двигателе являются нахождение скорости вращения, а также определение переходной характеристики электромагнитного момента, то необходимо прибегнуть к уравнениям, которые записаны в системе координат $(U, \vartheta, 0)$, воспользовавшись совокупностью формул (2.8)

$$\begin{aligned}
\frac{\psi_{su}}{dt} &= U_{su} - \frac{r_s}{L'_s} \psi_{su} + \omega_s \psi_{sv} \frac{k_r r_s}{L'_s} \psi_{ru} ; \\
\frac{\psi_{sv}}{dt} &= U_{sv} - \frac{r_s}{L'_s} \psi_{sv} - \omega_s \psi_{su} \frac{k_r r_s}{L'_s} \psi_{rv} ; \\
\frac{\psi_{ru}}{dt} &= \frac{k_r r_r}{L'_s} \psi_{su} - \frac{r_r}{L'_r} \psi_{ru} - \omega_s S_M \psi_{rv} ; \\
\frac{\psi_{rv}}{dt} &= \frac{k_r r_r}{L'_s} \psi_{sv} - \frac{r_r}{L'_r} \psi_{rv} - \omega_s S_M \psi_{ru} ; \\
M_{\text{э}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{k_s}{L'_r} (\psi_{ru} \psi_{sv} - \psi_{rv} \psi_{su}) ; \\
S_M &= (\omega_s - \omega_r) / \omega_s .
\end{aligned}
\tag{2.8}$$

Использование математических моделей, в основе которых лежит обобщенная электрическая машина с уравнениями потокосцеплений, а также токов, дают возможность наблюдать за скоростью вращения, моментами, токами не только в установившихся, но и в переходных режимах работы, позволяют получить статические и динамические механические, а также электромеханические характеристики.

На определение варианта записи для уравнений, описывающих преобразование в асинхронном двигателе, для составления его математической модели влияют в основном, с одной стороны – критерии работоспособности, а также простота модели, а с другой стороны - переменные, представляющие интерес при анализе: наличие минимального количества линейных и нелинейных токов, обеспечение устойчивости при работе модели; удобство задания внешних условий, а также простота вывода текущих значений для исследуемых параметров.

Результаты исследования в математических моделях электромеханического преобразования энергии при различных режимах являются достаточно приближенными к натуральным, полученным с реальных действующих установок. В зависимости от начальных условий при использовании одной модели, можно добиться любого переходного процесса (торможение, реверс, сброс нагрузки, пуск, наброс нагрузки, рекуперацию и другие).

При математическом описании, а также моделировании электропривода на базе асинхронного двигателя с частотным управлением, запись величин векторов асинхронного двигателя производится при использовании ортогональной системе координат, α, β , которая неподвижна относительно статора. Для этого воспользуемся совокупностью формул (2.9)

$$U_s = U_{s\alpha} + j \cdot U_{s\beta}; \quad i_s = i_{s\alpha} + j \cdot i_{s\beta}; \quad \psi_s = \psi_{s\alpha} + j \cdot \psi_{s\beta}; \quad \psi_r = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta}. \quad (2.9)$$

Удобство использования при анализе системы координат α, β , обосновано тем, что в статоре асинхронной машины присутствует не симметрия в виде включения транзисторных ключей автономного инвертора, а также наличие короткого замыкания статорных цепей. Магнитная ось фазы а настоящей асинхронной машины совпадает с осью а. В связи с этим реальный ток будет совпадать с проекцией тока i_{sa} .

Используя в качестве основы системы уравнений (2.1-2.9) произведем запись уравнений для асинхронного двигателя, при этом предположим, что $\omega_k = 0$ и $U_r = 0$, воспользовавшись совокупностью формул (2.10) и (2.11)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{d\alpha} &= U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}; & \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{d\alpha} &= U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}; & \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= L_s \cdot i_{s\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}; & \psi_{r\alpha} &= L_m \cdot i_{s\alpha} + L_r \cdot i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} &= L_s \cdot i_{s\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}; & \psi_{r\beta} &= L_m \cdot i_{s\beta} + L_r \cdot i_{r\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Систему уравнений (2.9) для простоты постройки математической модели выразим через токи, воспользовавшись совокупностью формул (2.12)

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{1}{L'_s} \cdot \psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{L'_s} \cdot \psi_{r\alpha}; & i_{r\alpha} &= -\frac{k_s}{L'_r} \cdot \psi_{s\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{L'_s} \cdot \psi_{s\beta} - \frac{k_r}{L'_s} \cdot \psi_{r\beta}; & i_{r\beta} &= -\frac{k_s}{L'_r} \cdot \psi_{s\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

где $L'_r = \sigma \cdot L_r$, $L'_s = \sigma \cdot L_s$, $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ и $k_s = \frac{L_m}{L_s}$ - формулы коэффициентов связи для ротора и статора;

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) = (1 - k_s \cdot k_r) - \text{формула коэффициента для рассеяния.}$$

Из всего этого можно сделать вывод, что в асинхронном двигателе выражение электромагнитного момента представлено как векторное произведение векторов тока, а также потокосцеплений. Отбор определенного вида уравнения, описывающего электромагнитный момент в асинхронном двигателе, производится по условиям, которые необходимы для рациональной постройки структурной схемы для сборки и моделирования математической модели, воспользуемся формулой (2.13)

$$M_{\text{Э}} = \frac{3}{2} \cdot p_{\Pi} \cdot (\psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.13)$$

Для записи Закона для движения электродвигателя с учетом одномассовости системы, воспользуемся формулой (2.14)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot (M_{\varepsilon} - M_c), \quad (2.14)$$

где J_{Σ} - суммарный момент для инерции ротора, а также механизмов, приведенных в ротору;

M_c - момент нагрузки в статике.

2.3 Исследование рабочих режимов с учетом изменения параметров системы и действия возмущений

В балансировочной машине для перемещения заготовки коленчатого вала используется загрузочный портал. Также он отвечает за перемещение отцентрованного коленчатого вала прошедшего обработку. Вал центруется за счет ножей сверлильной станции.

Отличительная характеристика загрузочного портала состоит в том, что он работает в циклическом режиме. При работе в цикле от электропривода загрузочного портала требуется быстрое торможение, а также быстрый разгон.

Загрузочный портал работает в циклическом режиме. Это является его характерной особенностью. В циклическом режиме очень важен малый период разгона и торможения. Для обеспечения быстрых переходных процессов, которые происходят внутри асинхронного электропривода, они должны иметь вид в виде апериодической кривой для того, чтобы получить требуемую высокую точность при перемещении портала балансировочной машины.

Данные о технических параметрах загрузочного портала балансировочной машины:

Скорость перемещения – 3 м/с

Общая масса тележки – 500 кг

Диаметр колеса – 0,082 м

Общее время продолжительности цикла – 26,1с

Максимальное допустимое ускорение – 5 м/с²

Коэффициент полезного действия для механизма – 0,79

Предполагаемая частота вращения двигателя составляет 3000 об/мин

Продолжительность включения ПВ – 8 %

Осуществим расчет параметрам для создания нагрузочной диаграммы для электропривода.

Для расчета времени продолжительности времени для пуска и торможения, воспользуемся формулой (2.15)

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = \frac{\vartheta_{\text{НОМ}}}{a}, \quad (2.15)$$
$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = \frac{2}{4} = 0,5 \text{ с}$$

Для нахождения времени работы, воспользуемся формулой (2.16)

$$t_{\text{р}} = t_{\text{ц}} \cdot \frac{\text{ПВ}\%}{100}, \quad (2.16)$$
$$t_{\text{р}} = 26,1 \cdot 0,08 = 2,088 \text{ с}$$

Для периода установившегося движения, воспользуемся формулой (2.17),
с

$$t_{\text{уст}} = t_{\text{р}} - t_{\text{п}} - t_{\text{т}}, \quad (2.17)$$
$$t_{\text{уст}} = 2,088 - 0,5 - 0,5 = 1,088 \text{ с}$$

Так как $t_{\text{п}} < t_{\text{уст}}$, то для дальнейшего расчета предварительный выбор двигателя, с учетом влияния динамических нагрузок, осуществляем по рассчитанной диаграмме работы для исполнительного механизма.

Для того, чтобы произвести расчет для статических нагрузок, произведем нужные нам расчеты

По формуле (2.18) определяем вес для тележки, Н

$$G_0 = m_0 \cdot g, \quad (2.18)$$

где g – табличный коэффициент для ускорения свободного падения, м/с²

$$G_0 = 500 \cdot 9,81 = 4905 \text{ Н}$$

Произведем расчет силы трения для механизма, воспользуемся формулой (2.14), Н

$$F_{\text{тр}} = k_p \cdot \frac{G_0 \cdot f_k}{D_k}, \quad (2.19)$$

где $f_k = 0,35 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент трения при движении приводного колеса

$k_p = 2,5$ – коэффициент трения для головки зуба приводного колеса

$$F_{\text{тр}} = 2,5 \cdot \frac{4905 \cdot 0,00035}{0,079} = 108,655 \text{ Н}$$

Произведем расчет силы статического сопротивления, воспользуемся формулой (2.20)

$$F_c = F_{\text{тр}} = 108,655 \text{ Н} \quad (2.20)$$

Произведем расчет скорости вращения двигателя, воспользуемся формулой (2.21)

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}, \quad (2.21)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с}$$

Произведем расчет для радиуса приведения, воспользуемся формулой (2.22)

$$\rho = \frac{v}{\omega_{\text{дв}}}, \quad (2.22)$$

$$\rho = \frac{2}{314} = 0,0064 \text{ м}$$

Определим статический момент, воспользуемся формулой (2.23)

$$M_c = \frac{F_c \cdot \rho}{\eta}, \quad (2.23)$$

$$M_c = \frac{108,655 \cdot 0,0064}{0,8} = 0,869 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Произведем расчеты для построения динамических характеристик.

Найдем угловое ускорение, воспользуемся формулой (2.24)

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \frac{a_{\text{доп}}}{\rho}, \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \frac{4}{0,0064} = 625 \text{ 1/с}^2$$

Найдем момент инерции, воспользуемся формулой (2.25)

$$J_0 = m_0 \cdot \rho^2, \quad (2.25)$$

$$J_0 = 500 \cdot 0,0064^2 = 20,48 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Произведем расчет динамического момента, воспользуемся формулой (2.26)

$$M_{\text{дин}} = \frac{J_0 \cdot \varepsilon_{\text{доп}}}{\eta}, \quad (2.26)$$

$$M_{\text{дин}} = \frac{0,02048 \cdot 625}{0,8} = 16 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Произведем расчет пускового момента, воспользуемся формулой (2.27)

$$M_{\text{пуск}} = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (2.27)$$

$$M_{\text{пуск}} = 0,869 + 16 = 16,869 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Произведем расчет тормозящего момента, воспользуемся формулой (2.29)

$$M_{\text{торм}} = M_c - M_{\text{дин}}, \quad (2.29)$$

$$M_{\text{торм}} = 0,869 - 16 = -15,131 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Произведем расчет эквивалентного момента, воспользуемся формулой (2.30)

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_{\text{пуск}}^2 \cdot t_{\text{пуск}} + M_c^2 \cdot t_{\text{уст}} + M_{\text{торм}}^2 \cdot t_{\text{торм}}}{t_{\Sigma}}}, \quad (2.30)$$

Произведем расчет эквивалентного момента, воспользуемся формулой (2.31)

$$M_3 = \sqrt{\frac{(16,869)^2 \cdot 0,5 + (0,869)^2 \cdot 1,088 + (-15,131)^2 \cdot 0,5}{26,1}} = 3,141 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$P_{\text{треб}} = M_3 \cdot \omega, \quad (2.31)$$

$$P_{\text{треб}} = 3,141 \cdot 314 = 986,274 \text{ Вт}$$

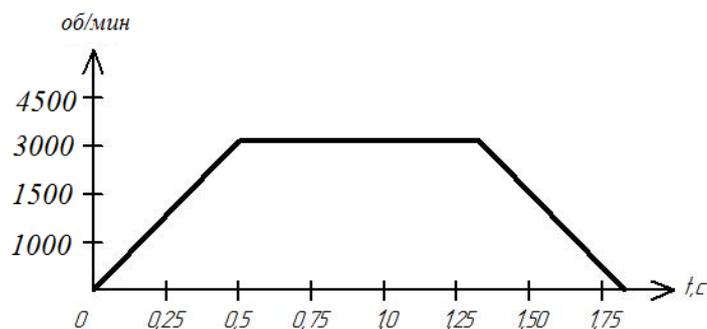


Рисунок 2.3 - Тахограмма электропривода портала

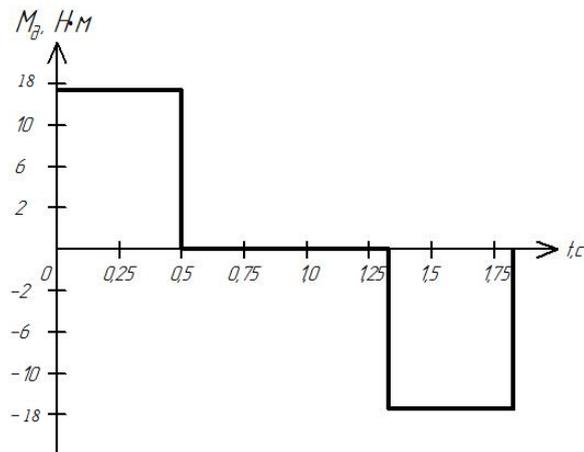


Рисунок 2.4 - Изменение динамических нагрузок механизма

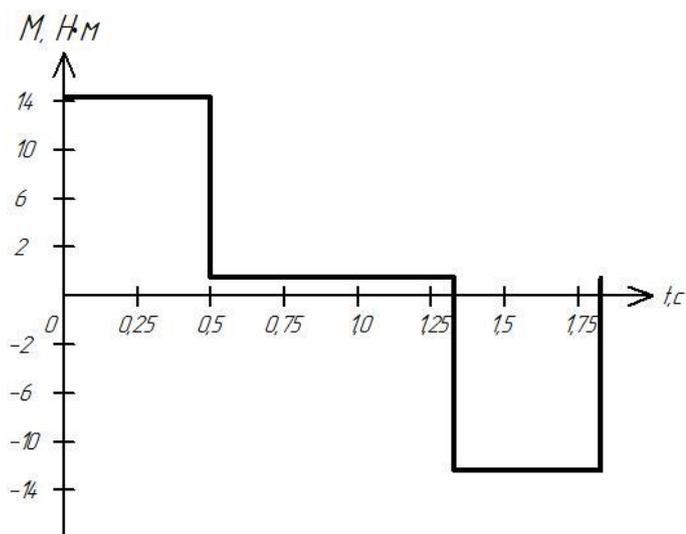


Рисунок 2.5 - Нагрузочная диаграмма электропривода

На рисунке 2.5 – представлена тахограмма изменения момента при пуске двигателя и при торможении.

После анализа полученных диаграмм цикла был выбран двигатель требуемой мощности, продолжительность работы которого и максимальный момент соответствуют расчетам. Тип выбранного двигателя 4А80В2У3. Параметры выбранного двигателя:

$$P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}; n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин}; I_{\text{max}} = 30,089 \text{ А}; I_{\text{ном}} = 4,629 \text{ А};$$

$$J_{\text{дв}} = 21,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; M_{\text{max}} = 15,413 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{ном}} = 7,006 \text{ Н} \cdot \text{м}; \eta_{\text{ном}} = 83 \%$$

Расчет синхронной частоты вращения для поля статора – $n_0 = \frac{120 \cdot f}{2p} =$
 $\frac{120 \cdot 50}{2} = 3000 \text{ об/мин}$

Расчет количество пар полюсов – $p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1$

Расчет номинального тока для двигателя $I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} =$
 $\frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,83} = 4,629 \text{ А}$

Расчет номинального вращательного момента – $M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\omega} = \frac{2200}{314} =$
 $7,006 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В состав силовой схема асинхронного электропривода входят трехфазный транзисторный инвертор UZ, а также неуправляемый выпрямитель UV.

Для обеспечения инверторного режима на выходе выпрямителя подключен конденсатор, который нужен для того, чтобы сбросить энергию от торможения через дополнительный транзистор на балластный резистор. Цифровая система управления, которая основана на базе микропроцессора CPU, отвечает за управление режима работы инвертора, а также за сброс накопившейся энергии на конденсаторе на балластный резистор.

Выходы блока с микропроцессором располагают как аналоговыми, так и цифровыми входами (клеммы 10-13) и выходами (клеммы 18-22). Схема предусматривает возможность ручного управления задания скорости через входа AIN1+ и AIN1-.

Контроль, а также измерение температуры осуществляется через клеммы 14 и 15. К инвертору можно подключиться через клеммы 23,24 интерфейса RS 485. В SIMATICS120 в выбранной комплектации встроена панель управления, на которой отображены в настоящий момент выбранные параметры инвертора, а также и клавиши для выбора соответствующего меню и установки параметров инвертора. Быстродействующий предохранитель F1 служит для обеспечения защиты токоведущей силовой части. Асинхронный электродвигатель подклю-

чается через клемное соединение в клемной коробке с выводами U,V,W. Защитное заземление осуществляется через клемму PE.

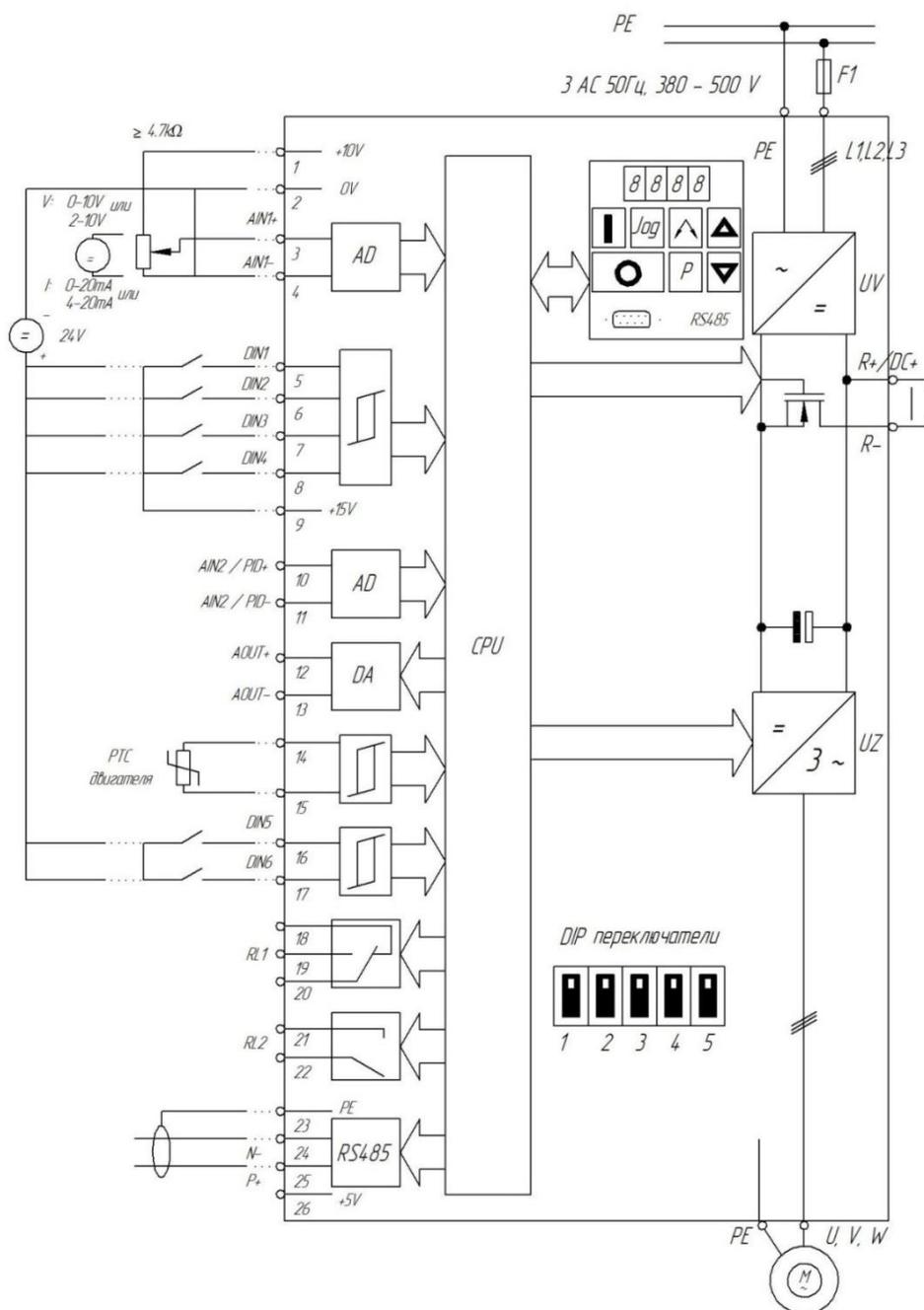


Рисунок 2.6 - Функциональная схема электропривода

Модель асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором, включает в свою структуру модель электропривода асинхронного электродвигателя, которая собрана в неподвижной системе координат (α, β). Также в нее входит система по управлению преобразователем координат в прямом, а также

в обратном направлении. Также она ориентирована во вращающихся координатах по вектору ротора $\underline{\psi}_r$.

Для постройки модели асинхронного двигателя необходимо рассчитать параметры, а также коэффициенты контуров регулирования. Также нужно учитывать что инвертор, собранный из транзисторов, учитывается в расчете как апериодическое звено и имеет малую постоянную времени $T_\mu = 5 \cdot 10^{-4}$ с. Остальные датчики, контролирующие скорость потокосцепления Ψ , тока I_A , а также скорости вращения ротора ω_r , следует рассматривать как безынерционные звенья.

Произведем расчет вектора для тока статора, воспользуемся формулой (2.32)

$$\underline{I}_s = I_{\phi H} \cos \varphi + j I_{\phi H} \sin \varphi, \quad (2.32)$$

$$\underline{I}_s = 4,616 \cdot 0,87 + j 4,616 \cdot 0,493 = 4,016 + j 2,276 \text{ А}$$

Расчет при холостом ходе тока, воспользуемся формулой (2.33)

$$\underline{I}_0 = j \frac{U_{\phi H}}{\omega \cdot L_s}, \quad (2.33)$$

$$\underline{I}_0 = j \frac{220}{314 \cdot 0,433} = j 1,618 \text{ А}$$

Вектор главного потокосцепления, воспользуемся формулой (2.34)

$$\underline{\psi}_0 = L_m \cdot \underline{I}_0, \quad (2.34)$$

$$\underline{\psi}_0 = 0,425 \cdot j 1,618 = j 0,688 \text{ Вб}$$

Индуктивность рассеяния фаз ротора, воспользуемся формулой (2.35)

$$L_{\sigma r} = L_r - L_m, \quad (2.35)$$

$$L_{\sigma r} = 0,437 - 0,425 = 0,012 \text{ Гн}$$

Вектор потокосцепление ротора, воспользуемся формулой (2.36)

$$\underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\psi}_0 - L_{\sigma r} \cdot \underline{I}_s, \quad (2.36)$$

$$\underline{\psi}_r = \frac{1}{0,973} \cdot j 0,688 - 0,012 \cdot 4,016 + j 2,276 = j 0,680 - 0,048 \text{ Вб}$$

Определим наибольшее значение для модуля потокосцепления ротора, воспользуемся формулой (2.37)

$$\psi_{\text{гм}} = \bar{2} \cdot \underline{\psi}_{\text{г}}, \quad (2.37)$$

$$\psi_{\text{гм}} = \bar{2} \cdot \sqrt{0,680^2 - 0,048^2} = 0,959 \text{ Вб}$$

Расчет коэффициента для датчика передачи потокосцепления, воспользуемся формулой (2.38)

$$k_{\psi} = \frac{U'}{\psi_{\text{гм}}}, \quad (2.38)$$

где $U' = 5 \text{ В}$ – разность потенциалов на выходе преобразователя

$$k_{\psi} = \frac{5}{0,959} = 5,214$$

Расчет коэффициента для датчика передачи датчика тока, воспользуемся формулой (2.39)

$$k_{\text{т}} = \frac{U'}{\lambda \cdot \bar{2} \cdot I_{\text{фн}}}, \quad (2.39)$$

$$k_{\text{т}} = \frac{5}{2,2 \cdot \bar{2} \cdot 4,616} = 0,348$$

Расчет коэффициента для датчика усиления транзисторного инвертора, воспользуемся формулой (2.40)

$$k_{\text{п}} = \frac{k_3 \cdot \bar{2} \cdot U_{\text{фн}}}{U'}, \quad (2.40)$$

$$k_{\text{п}} = \frac{1,13 \cdot \bar{2} \cdot 220}{5} = 70,315$$

Расчет параметров для регулятора тока, воспользуемся формулами (2.41) и (2.42)

$$\tau_{\text{т}} = T_{\text{с}} = 0,002198 \text{ с}, \quad (2.41)$$

$$T_{\text{ит}} = \frac{2T_{\mu} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{т}}}{R_{\text{с}'}} \quad (2.42)$$

$$T_{\text{ит}} = \frac{2 \cdot 0,0005 \cdot 70,315 \cdot 0,348}{9,099} = 0,0027 \text{ с}$$

Расчет параметров для регулятора потокосцепления, воспользуемся формулами (2.43) – (2.46)

$$\tau_{\psi} = T_{\text{г}} = 0,138 \text{ с}, \quad (2.43)$$

$$\varepsilon = \frac{R_{\text{с}'}}{R_{\text{с}}}, \quad (2.44)$$

$$\varepsilon = \frac{9,099}{6,101} = 1,491 \text{ с},$$

$$T_{и\psi} = \frac{4T_{\mu} \cdot \varepsilon \cdot L_m \cdot k_{\psi}}{k_r}, \quad (2.45)$$

$$T_{и\psi} = \frac{4 \cdot 0,0005 \cdot 1,491 \cdot 0,425 \cdot 5,214}{0,348} = 0,019 \text{ с}$$

$$k_{p\psi} = \frac{\tau_{\psi}}{T_{и\psi}}, \quad (2.46)$$

$$k_{p\psi} = \frac{0,138}{0,019} = 7,263$$

Расчет коэффициента для датчика передачи скорости, воспользуемся формулой (2.47)

$$k_c = \frac{U_r}{\omega_o}, \quad (2.47)$$

$$k_c = \frac{5}{314} = 0,0159$$

Расчет параметров для регулятора скорости, воспользуемся формулами (2.48) – (2.51)

$$k_{pc} = \frac{J \cdot k_r}{6 \cdot k_r \cdot T_{\mu} \cdot k_c \cdot p_n \cdot \psi_{rm}}, \quad (2.48)$$

$$k_{pc} = \frac{0,00213 \cdot 0,348}{6 \cdot 0,973 \cdot 0,0005 \cdot 0,0159 \cdot 1 \cdot 0,959} = 16,654$$

$$T_T = 2 \cdot T_{\mu}, \quad (2.49)$$

$$T_T = 2 \cdot 0,0005 = 0,001 \text{ с}$$

$$\tau_{ис} = 4 \cdot T_T, \quad (2.50)$$

$$\tau_{ис} = 4 \cdot 0,001 = 0,004 \text{ с}$$

$$T_{ис} = \frac{12 \cdot T_T^2 \cdot p_n \cdot k_r \cdot k_c \cdot \psi_{rm}}{k_r \cdot J}, \quad (2.51)$$

$$T_{ис} = \frac{12 \cdot 0,001^2 \cdot 1 \cdot 0,973 \cdot 0,0159 \cdot 0,959}{0,348 \cdot 0,00213} = 2,402 \cdot 10^{-4} = 0,0002402 \text{ с}$$

Смоделируем электропривод с асинхронным двигателем при использовании частотно-векторного управления и преобразования координат.

Для моделирования работы электропривода с асинхронным двигателем в неподвижной системе координат (α, β) , собранная модель должна содержать си-

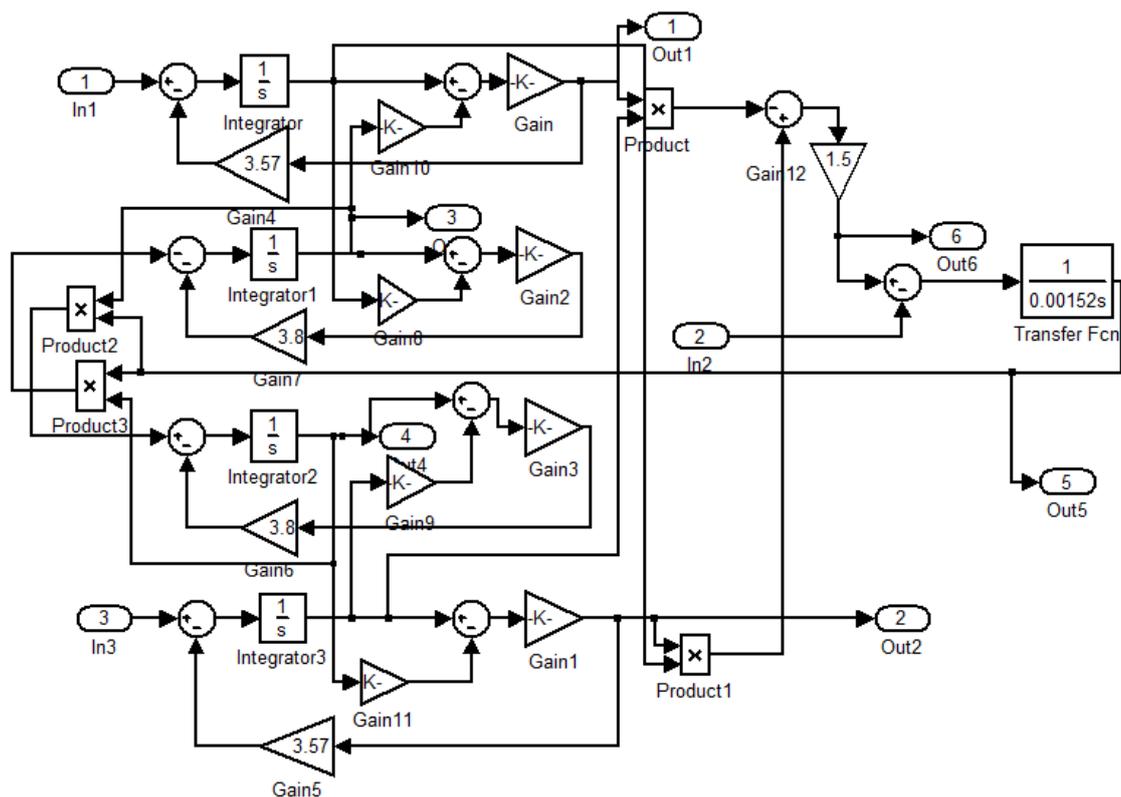


Рисунок 2.8 – Полная модель асинхронного двигателя

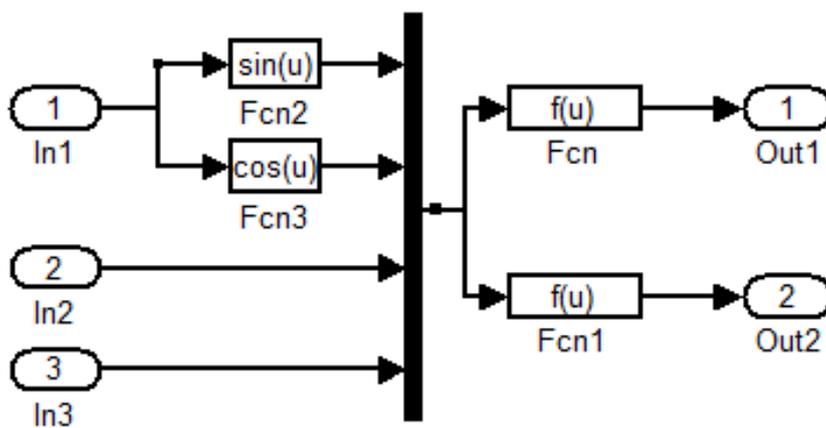


Рисунок 2.9 - Прямой преобразователь координат

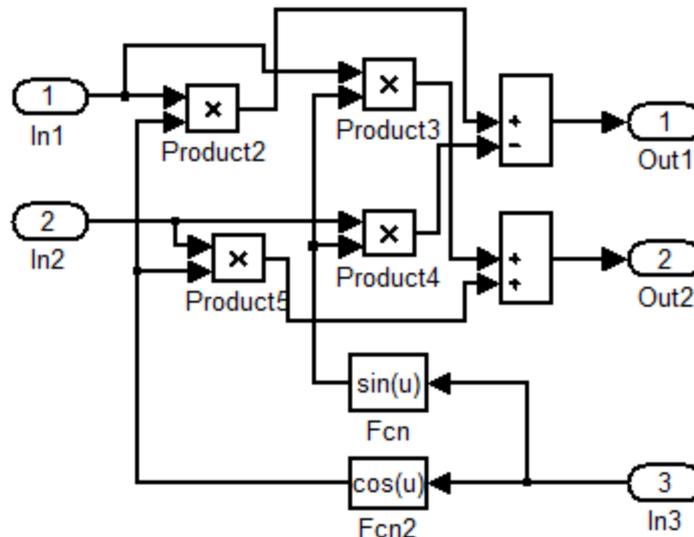


Рисунок 2.10 - Обратный преобразователь координат

Вектор –фильтр VF состоит из Complex to Magnitude, Real Imag to Complex, а также Angle. Он контролирует канал стабилизации модуля ψ_r вектора потокосцепления ротора и канал регулирования угловой скорости $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ вращения ротора. В представленной выше подсхеме (Subsystem 2), Происходит прямое координатное преобразование составляющих тока статора $i_{s\alpha}$ и $i_{s\beta}$ из вращающейся системы координат (1,2). В подсхеме (Subsystem 1) происходит обратное преобразование сигналов постоянного тока U_{s1} , и U_{s2} из вращающейся системы координат(1,2) в неподвижную систему координат (α, β) с сигналами $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$.

С помощью блока Real – Image to Complex, происходит преобразование составляющих $\psi_{r\alpha}$, и $\psi_{r\beta}$ модуля вектора потокосцепления ротора в вектор ψ_r в вектор – фильтре VF. Далее в блоке Complex to Magnitude – Angle происходит вычисление модуля ψ_r , а также текущего угла u состояния вектора.

Канал стабилизации модуля ψ_r вектора потокосцепления ротора состоит из внутреннего контура регулирования намагничивающей i_{s1} составляющей статорного тока и внешнего контура регулирования модуля ψ_r потокосцепления ротора. Контур регулирования i_{s1} содержит датчик ВА1 тока и регулятор АА1 тока, а контур регулирования ψ_r – преобразователь $U\psi$ модуля потокосцепле-

ния и регулятор модуля потокосцепления, включающий два регулятора, соединенных параллельно: пропорциональный регулятор $P - A\psi$ и интегральный регулятор $I - A\psi$. В канале, отвечающем за регулирование скорости вращения электродвигателя находится внутренний контур, который регулирует квадратурную составляющую тока статора I_{s2} (регулятор тока AA2 и датчик тока BA). А внешний контур состоит из регулятора скорости вращения AR, блока ограничения тока Saturation, а также тахогенератора BR.

В моделируемой модели, модель системы управления выполняется во вращающейся системе координат (1,2), а асинхронный электродвигатель и преобразователь частоты выполнены в неподвижной системе координат (a,B). В модели системы управления действуют сигналы, которые передают постоянный ток. Данное решение позволяет собрать контуры регулирования, которые основаны на принципах подчиненного регулирования. Также это дает использовать возможность применять в таких контурах стандартные настройки для регуляторов, которые разработаны для приводов на базе электродвигателей постоянного тока. Данный метод к расчету и моделированию применяется в нашем случае для канала, обеспечивающего стабилизацию модуля потокосцепления ротора, а также в канале по регулированию электромагнитного момента [10,20,21,22 - 25].

На рисунке 2.10 представлены кривые для статорных токов $i_{s\alpha}$ и $i_{s\beta}$ в неподвижной системе координат (α, β) , которые были получены из модели для режима пуска при номинальной нагрузке на валу асинхронного электродвигателя, который работал в установившемся режиме работы на интервале 0,16 – 0,3 сек., а также и при сбросе нагрузки в момент времени 0,3 сек.

Полученные кривые токов статора i_{s1} и i_{s2} для проведения сравнительного анализа представлены во вращающейся системе координат (1,2) на рис.2.11.

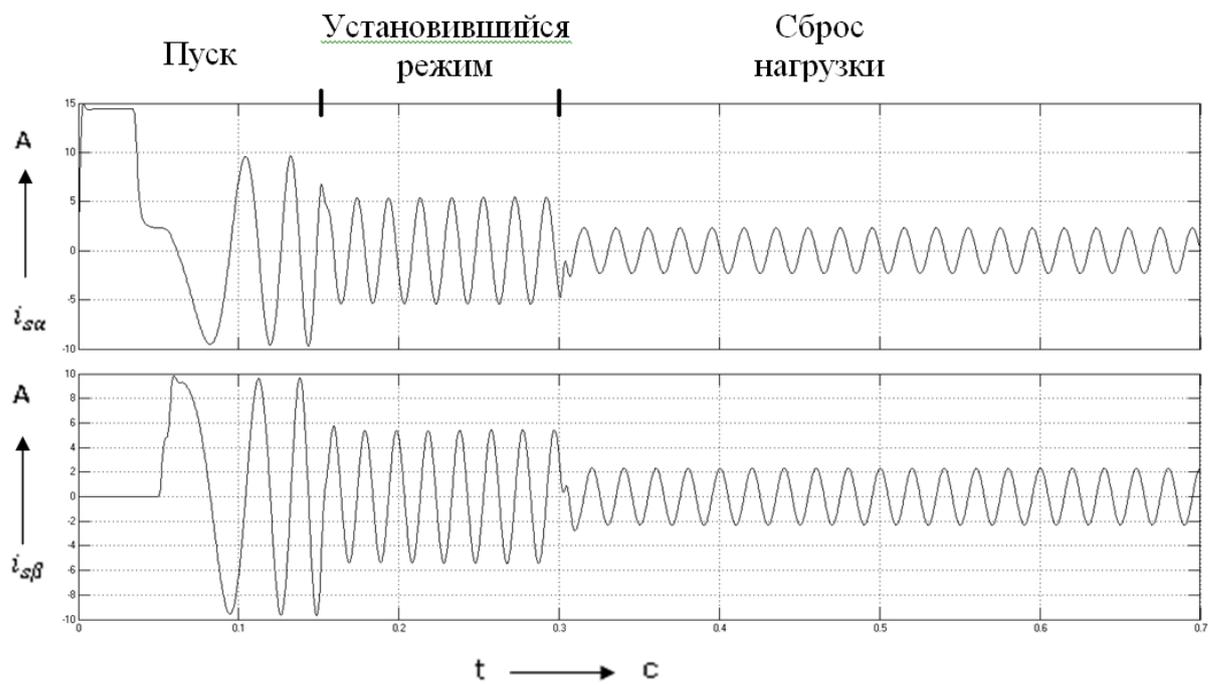


Рисунок 2.10 - Полученные статорные токи в неподвижной системе координат при пуске, в установившемся режиме, а также сбросе нагрузки

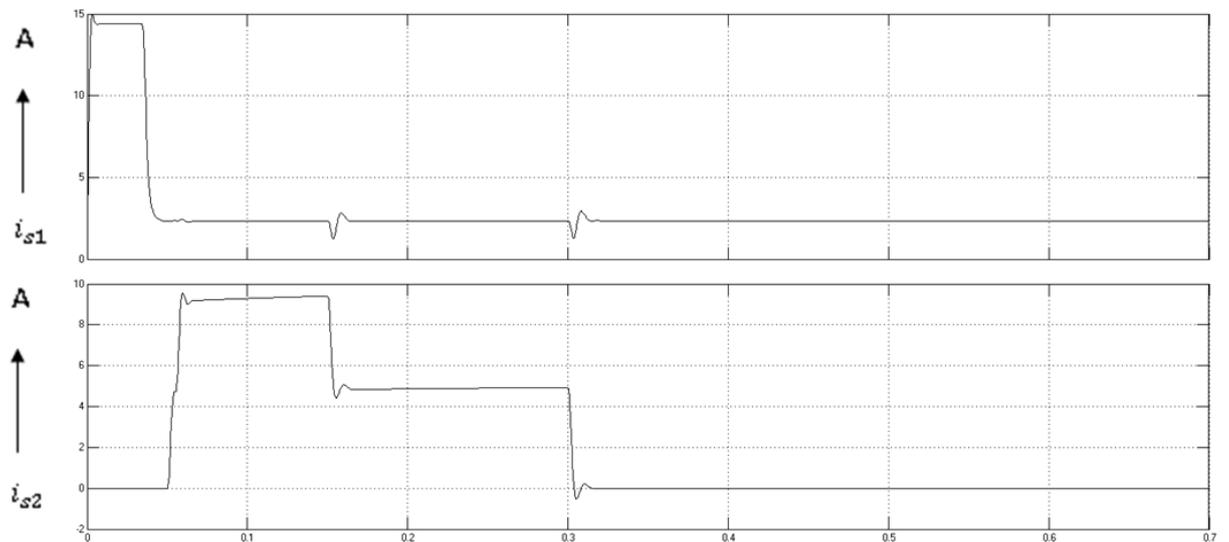


Рисунок 2.11 - Статорные токи во вращающейся системе координат при пуске, в установившемся режиме и при сбросе нагрузки

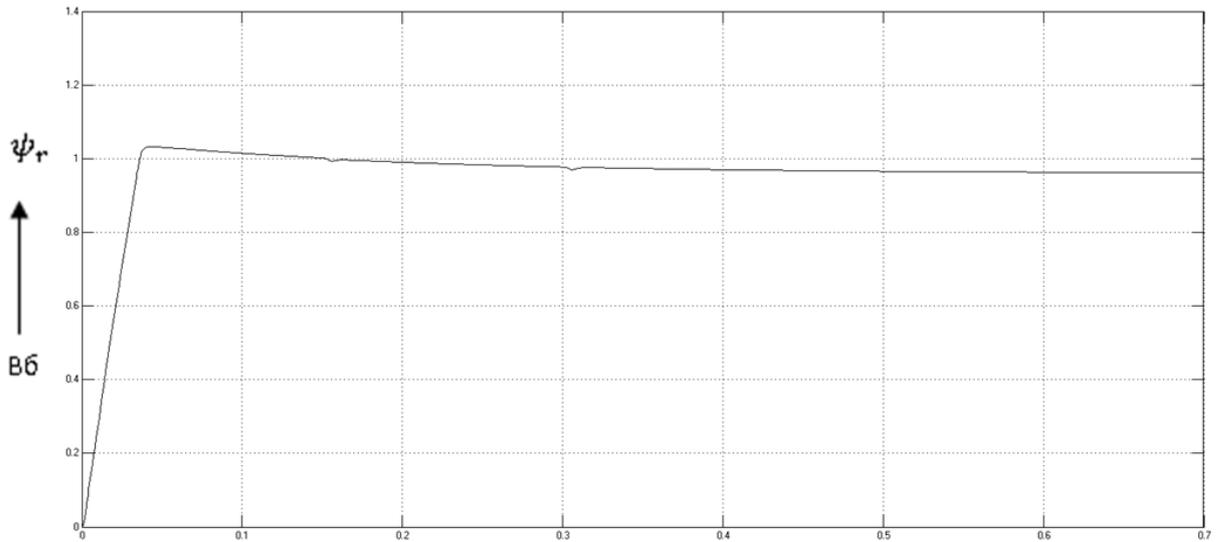


Рисунок 2.12 - Модульное значение потокосцепления ротора при пуске, в установившемся режиме и при сбросе нагрузки

При регулировании скорости вращения асинхронного электродвигателя, значение модуля потокосцепления ротора не изменяется. Значения модуля потокосцепления показаны на рисунке 2.12.

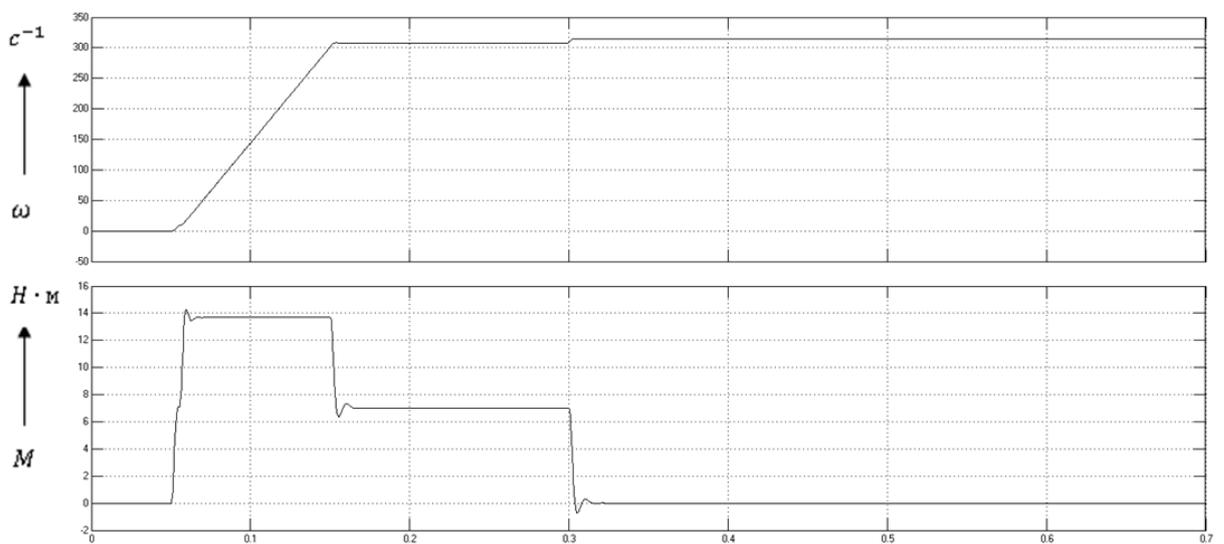


Рисунок 2.13 - Кривые скорости и электромагнитного момента электропривода при пуске, в установившемся режиме работы и при сбросе нагрузки

Кривые изменения электромагнитного момента M и изменения скорости вращения ротора ω представлены на рис. 2.13. Осуществление пуска системы асинхронного электропривода производится за счет изменения напряжения $U_{з\psi}$ и $U_{зс}$ в диапазоне от 0 до $U_{з0}$. Данные параметры отвечают значениям скорости $\omega = 314$ рад/с, а также потокосцепления $\psi_{гm} = 0,961$ Вб. На вход модели AR подается напряжение задания скорости $U_{зс}$ с установленной задержкой по времени, за которое потокосцепление ротора достигнет номинального значения. Время установленной задержки устанавливается в параметрах блока датчика интенсивности модели SJ и составляет $t = 0,05$ сек. На всем периоде пуска, квадратурная составляющая тока i_{s2} остается неизменной. За счет этого гарантируется линейное увеличение скорости вращения при запуске асинхронного электропривода. Переходный процесс занимает 0,15 сек. Наблюдается полное отсутствие перерегулирования скорости вращения электродвигателя. Отрезок времени для установившегося режима соответствует отрезку времени 0,16-0,3 секунды. В этот момент скорость вращения асинхронного электродвигателя составляет 314 рад/с, а момент на валу – номинальному моменту, равному $M_n = 7$ Н·м. Момент времени $t = 0,3$ секунды соответствует внезапному сбросу нагрузки при работе электропривода в установившемся режиме. В этот момент управляющее напряжение скоростью остается неизменным $U_{зс} = U_{з0}$, но величина нагрузки уменьшается со своего значения до нуля.

Сброс нагрузки вызывает увеличение скорости вращения асинхронного электродвигателя до 320 рад/с. Рост величины скорости равен брад/сек, что составляет 1,91% от номинальной скорости вращения. Данная жесткость механических характеристик позволяет использовать большой диапазон регулирования скорости вращения. Диапазон скорости составляет $D=120$.

2.4 Выводы

1. Разработана и собрана функциональная схема системы на базе асинхронного двигателя с векторным управлением с использованием преобразователя частоты Sinumeric S120 фирмы Siemens, которая позволяет

добиться высоких энергетических показателей для работы в режимах с переменной нагрузкой, а также заданным быстродействием перемещения.

2. Произведена разработка структурной схемы, а также произведено моделирование модели системы с частотно-векторным управлением для асинхронного электродвигателя портального манипулятора. Данная схема позволяет произвести исследования измерения переменных координат при перемещении портала, а также позволяет проводить исследования электромеханических процессов при различных режимах работы портала.

3. Проведено моделирование электропривода портала. Полученные динамические и статические характеристики говорят о том, что при работе асинхронного двигателя при постоянстве магнитного потока независимо от режимов его работы, обеспечивают более высокие энергетические показатели.

Глава 3 Оптимизация и настройка параметров регуляторов позиционного электропривода с асинхронным двигателем привода портала

3.1 Оптимизация контуров регулирования позиционного электропривода с асинхронным двигателем и векторным управлением

На данной схеме асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором М показан в виде развернутой структурной схеме (рисунок 2.1). Так же на ней учтены все обратные связи. Для разделения каналов, отвечающих за регулирование скорости и модуля потокосцепления ротора, была введена компенсация, за счет введения специальных сигналов коррекции f_1 , f_2 , а также f_3 . Введенный сигнал коррекции f_1 отвечает за компенсацию влияния внутренней связи e_{T1} . Сигнал коррекции f_2 компенсирует влияние внутренней связи e_{T2} , а сигнал f_3 обеспечивает компенсацию влияния ЭДС вращения e_{ω} асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В канале регулирования модуля потокосцепления ротора $|\underline{\psi}|$, а также его стабилизации состоит из внешнего и внутреннего контура. Внутренний контур подчинен внешнему. Внутренний контур предназначен для управления намагничивающей составляющей тока статора i_{s1} , содержит датчик тока UA, а также регулятор тока AA1. Внешний контур отвечает за управления и регулировку потокосцепления. Во внешнем контуре расположился регулятор потокосцепления A ψ и датчик потокосцепления U ψ .

Канал для управления скоростью вращения асинхронного двигателя состоит из внутреннего и внешнего контура. Внутренний контур подчинен внешнему. Внутренний контур отвечает за регулировку квадратурной составляющей тока статора i_{s2} . В нем находятся регулятор тока AA2, а также датчик тока UA. Внешний контур отвечает за регулировку скорости вращения асинхронного двигателя. В нем находятся датчик скорости BR (тахогенератор) и регулятор скорости AR.

Для того, чтобы упростить схемы развязки контуров представленных на структурной схеме, можно заменить пропорциональный вектор скорости вращения $\omega_{\psi r}$ потокосцепления ротора на сигнал пропорциональный $p_{\Pi\omega}$. При учете данного упрощения в структурной схеме, определяем сигналы коррекции: f_1 , f_2 , а также f_3 , воспользуемся формулой (3.1)

$$W_1(p) = \frac{L_s p_n}{W_{UF}(p) k_T k_C}; W_2(p) = \frac{p_n k_r}{W_{UF}(p) k_T k_C} \quad (3.1)$$

где $W_{UF}(P)$ – передаточная функция преобразователей частоты UF.

Использование сигналов коррекции позволяет собрать упрощенную структурную схему модуля, отвечающего за стабилизацию модуля потокосцепления ротора, а также регулирования скорости вращения. Схема после упрощения показана на рис 4.6. Данная упрощенная схема позволяет провести оптимизацию контуров регулирования.

Воспользуемся формулой (3.2) для написания передаточной функции для разомкнутого типа контура регулирования намагничивающей составляющей тока статора i_{S1}

$$W_{TSI}(p) = W_{AA1}(p) \cdot \frac{k_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{1/R_s' \cdot k_T}{T_s p + 1} \quad (3.2)$$

где $W_{AA}(p)$ – передаточная функция регулятора тока, k_n – коэффициент усиления преобразователя; T_n — постоянная времени преобразователя частоты; k_T - коэффициент передачи датчика тока UA.

Принимая величину T_n как равную некомпенсированной постоянной времени T_μ , выбираем ПИ-регулятор в качестве регулятора и запишем передаточную функцию для него, воспользуемся формулой (3.3)

$$W_{AA1}(p) = \frac{\tau_p + 1}{T_{IT} p} \quad (3.3)$$

Параметры регулятора АА1 рассчитываются и настраиваются из настройки на технический оптимум по модулю. Для этого используем выражение передаточной функции оптимизированного контура, воспользуемся формулой (3.4)

$$W_{TSIO}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(2T_\mu p + 1)} \quad (3.4)$$

На основании равенства $W_{TS1} = W_{TSIO}$ находим параметры регулятора, воспользуемся формулой (3.4)

$$(3.5) \quad \tau_T = T_S; T_{ИТ} = 2T_\mu k_\mu \frac{1}{R_S} \cdot k_T$$

Найдем передаточную функцию после оптимизации замкнутого контура регулирования i_{S1} , воспользуемся формулой (3.4)

$$W_{OTS1}(p) = \frac{i_{S1}(p)}{i_{3S1}(p)} = \frac{\frac{1}{k_r}}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} = \frac{\frac{1}{k_r}}{2T_\mu p + 1} \quad (3.6)$$

Модуль потокосцепления ротора определяется через модуль главного потокосцепления двигателя. Для его нахождения нужно определить выражения для статорного тока, тока холостого хода, а также потокосцепления ротора ψ_r , воспользуемся формулами(3.7), (3.8)

$$\underline{i}_S = I_{SH} \cdot \cos \varphi + j I_{SH} \cdot \sin \varphi; I_0 = J \frac{U_{SH}}{\omega \cdot L_S}; \quad (3.7)$$

$$\underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\omega}_0 - L_{yr} \cdot \underline{i}_s = \frac{1}{K_r} \cdot L_m \cdot j \frac{U_{SH}}{\omega \cdot L_S} - L_{yr} (I_{SH} \cdot \cos \varphi + j I_{SH} \sin \varphi). \quad (3.8)$$

При оптимизации контура регулирования модуля потокосцепления ротора необходимо учитывать только одну большую постоянную $T_r = \frac{L_r}{R_r}$, так как $T_{S1} > T_{S2}$, и $T_{S2} \cong T_{S0}$. Данное условие позволяет получить функцию разомкнутого контура регулирования, воспользуемся формулой (3.9)

$$W_{OTS1}(p) = W_{A\psi}(p) \frac{\frac{1}{k_r} \varepsilon L_m k_\psi}{(2T_\mu p + 1)(T_{S1} p + 1)} \quad (3.9)$$

где $W_{A\psi}$ - передаточная функция регулятора модуля потокосцепления;

$$\varepsilon = \frac{R'_s}{R_s}; k_{\psi} = \frac{U'}{\psi_{rm}} = \frac{U'}{\sqrt{2} \cdot \psi_r} - \text{формула коэффициента передачи для датчика пото-$$

косцепления ротора; ψ_{rm} - значение максимального модуля для потокосцепления ротора.

Из представленных выше формул получаем передаточную функцию регулятора модуля потокосцепления ротора с настройкой параметров на технический оптимум по модулю, воспользуемся формулами (3.10) и (3.11)

$$W_{A\psi}(p) = \frac{\tau_{\psi} p + 1}{T_{C\psi} p} \quad (3.10)$$

$$\text{где } \tau_{\psi} = T_{s1}; T_{C\psi} = 4T_{\mu} \frac{1/k_T}{\varepsilon L_m k_{\psi}} \quad (3.11)$$

Оптимизация в контуре квадратурной составляющей тока статора i_{s2} в канале управления скоростью вращения двигателя производится так же, как и в оптимизации контура намагничивающей составляющей тока статора i_{s1} . После оптимизации для записи передаточной функции воспользуемся формулой (3.12)

$$W_{ots2}(p) = \frac{i_{s2}(p)}{U_{3s2}(p)} = \frac{1/k_T}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \cong \frac{1/k_T}{2T_{\mu} p + 1} \quad (3.12)$$

Запишем уравнение в разомкнутом контуре воспользуемся формулой (3.13), где передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости вращения электродвигателя имеет вид

$$W_c(p) = W_{AR}(p) \cdot \frac{1/k_T}{2T_{\mu} p + 1} \cdot \frac{3P_n k_r k_c \psi_r}{2Jp}, \quad (3.13)$$

где $k_c = U'/\omega_0$ - коэффициент передачи от тахогенератора BR; ω_0 - скорость холостого хода электродвигателя при максимальной частоте преобразователя UF.

Оптимизацию контура осуществляется включением ПИ – регулятора в контур и его настройки на симметричный оптимум. Воспользуемся формулой

(3.14) для описания передаточной функции замкнутого контура скорости вращения

$$W_{occ}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3c}(p)} = \frac{1/k_T}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p + 4T_\mu p + 1}, \quad (3.14)$$

где $T_T = 2T_\mu$ - постоянная времени оптимизированного контура тока.

Выражение (3.14) получается при условии, что задающий сигнал U_{3c} подается через фильтр F, который имеет передаточную функцию, представленную формулой (3.15)

$$W_{AR}(p) = \frac{\tau_{ис} p + 1}{T_{ис} p} \quad (3.15)$$

$$\text{где } \tau_{ис} = 4T_T; T_{ис} = \frac{12T_T^2 p_n k_r k_c \psi_r}{k_T J}. \quad (3.16)$$

3.2 Математическое моделирование и исследование работы асинхронного двигателя с векторным управлением

Измерение угла и скорости поворота ротора, а также потокосцеплений требуют наличие соответствующих датчиков в асинхронном двигателе. Наличие этих датчиков не всегда желательно или возможно. Из-за этого задача, связанная с совершенствованием старых, а также разработкой новых электроприводов с управлением по вектору без датчиков, которые встроены в двигатель или пристроенных к валу, является актуальной на данный момент. В настоящее время электропривода, на базе серийных асинхронных электродвигателей с управлением по вектору без датчиков применяются в большинстве отраслей промышленности и не только. Они обеспечивают стальную функциональность машин, которые работают в условиях ударных нагрузок, а также вибраций. Также они обеспечивают работу устройств как дробилки, подъемно-транспортные средства, намотки, механизмов взрывоопасных и химических производств.

Современные электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с векторным управлением обладают недостаточно высокими динамическими и статическими рабочими показателями. В основном диапазон, позволяющий регулировать скорость не превышает более 100, а полоса пропускания в контуре скорости не превышает 8-10 Гц. К тому же современные производители электроприводов стараются не указывать диапазон регулирования и полосу пропускания в технической документации.

В связи с изменениями параметров в процессе работы асинхронного двигателя при использовании векторного управления трудно добиться высокого качества работы от электропривода. Одними из основных параметров двигателя меняющихся во время работы являются температура сопротивления обмоток ротора и статора. Также к наиболее важным параметрам является изменение взаимной индукции, которая зависит от тока цепи намагничивания. Дальнейшее совершенствование, а также адаптация цифровых систем управления может позволить преодолеть в недалеком будущем описанные выше трудности, а также привести к расширению области использования электроприводов с бездатчиковым управлением [28 - 30, 33,34].

Для того чтобы произвести вычисления тригонометрических функций $\sin \gamma$ и $\cos \gamma$, а также модуля вектора потокосцепления ротора ψ_r и текущего значения его аргумента γ необходимо создать наблюдателя. Наблюдатель входит в состав модели асинхронного короткозамкнутого двигателя. Угловая скорость вращения ротора ω , а также токи, протекающие в статоре в неподвижной системе координат $i^{s\alpha}$, $i^{s\beta}$ представляют собой входные величины для модели наблюдателя.

Для постройки модели наблюдателя необходимо воспользоваться уравнениям асинхронной машины для вращающейся системы координат (1,2), воспользуемся формулой (3.17)

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \frac{R_r}{L_r} \cdot \psi_r(p) + p \cdot \psi_r(p) - \frac{L_m}{L_r} R_r \cdot i_{s1}(p), \\ 0 &= -\frac{L_m}{L_r} \cdot R_r \cdot i_{s2}(p) + \omega_{\psi r}(p) \cdot \psi_r(p) - p_n \cdot \omega(p) \cdot \psi_r(p). \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Из представленных выше уравнений производим определение частоты, а также потокосцепление, воспользуемся формулой (3.18)

$$\left. \begin{aligned} \psi_r(p) &= \frac{L_m}{T_r \cdot p + 1} \cdot i_{s1}(p), \\ \omega_{\psi r} - p_n \cdot \omega &= \frac{L_m}{T_r \cdot \psi_r(p)} \cdot i_{s2}(p). \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Взаимосвязь между протекающими токами в обмотке статора для координатной системы (α, β) , воспользуемся формулой (3.19)

$$\left. \begin{aligned} i_{s1} &= i_{s\alpha} \cdot \cos \gamma + i_{s\beta} \cdot \sin \gamma, \\ i_{s2} &= -i_{s\alpha} \cdot \sin \gamma + i_{s\beta} \cdot \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

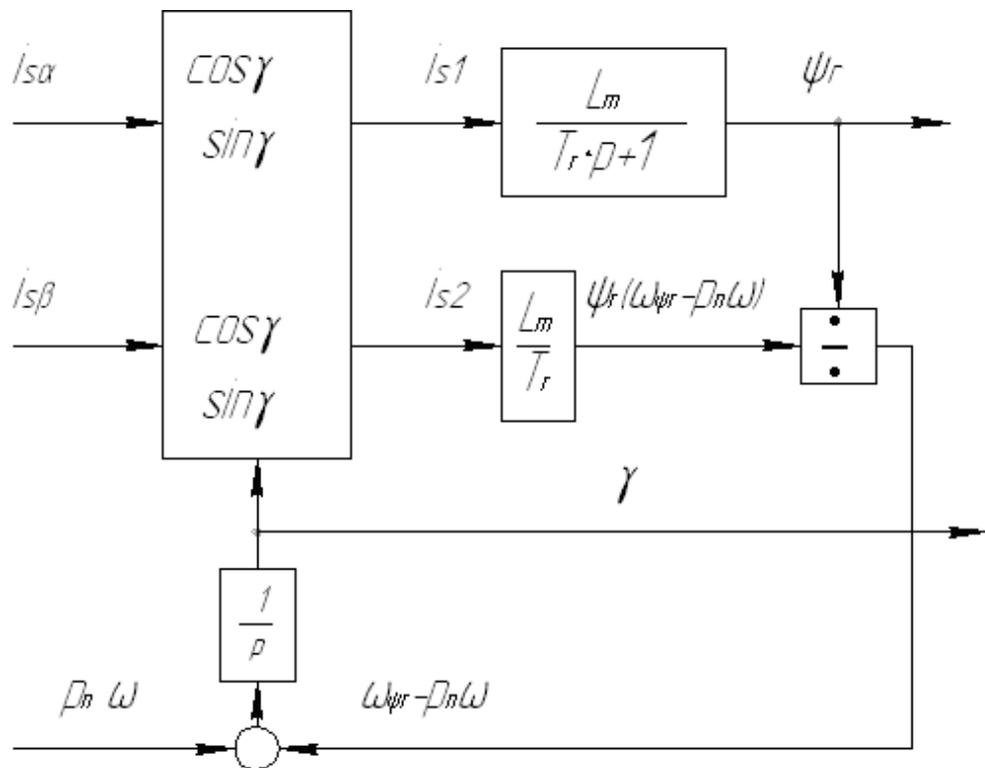


Рисунок 3.1 - Структурная схема наблюдателя вектора потокосцепления ротора в координатах (1,2)

Стабильность R_r ротора оказывает существенное влияние на точность вычисления γ , а также ψ_r . На сопротивление ротора влияет режим работы двигателя, а также температура нагрева. Из-за это R_r может изменять в 1,5-2 раза от номинального. Представленную выше схему рационально применять в системах с автоматическим регулированием с управлением по вектору, а также содержащие датчик для определение скорости ротора [10].

Для того чтобы определить векторное значение для потокосцепления ротора в неподвижной системе координат, необходимо записать уравнения для асинхронного электродвигателя в операторной форме, используя неподвижную систему координат (α, β) , воспользуемся формулами (3.20) и (3.21)

$$0 = R_r \cdot \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} - j\omega \underline{\psi}_r, \quad (3.20)$$

$$\underline{i}_r = \frac{1}{L_r} \underline{\psi}_r - \frac{L_m}{L_r} \underline{i}_s. \quad (3.21)$$

Если поставить выражения (3.20) в (3.21), а также перейти к операторской форме, то получим уравнение, воспользуемся формулой (3.22)

$$L_m \underline{i}_s = \underline{\psi}_r \left(1 + \frac{L_r}{R_r} p \right) - j\omega \underline{\psi}_r. \quad (3.22)$$

Воспользовавшись выражениями $\underline{\psi}_r = \underline{\psi}_{r\alpha} + j\underline{\psi}_{r\beta}$ и $\underline{i}_s = \underline{i}_{s\alpha} + j\underline{i}_{s\beta}$, можно получить выражения для составляющих, входящих в вектор потокосцепления ротора в неподвижной системе координат (α, β) , воспользуемся формулами (3.23) и (3.24)

$$\underline{\psi}_{r\alpha} = \frac{\underline{i}_{s\alpha} \cdot L_m - \underline{\psi}_{r\beta} \cdot \omega \cdot T_r}{1 + pT_r}, \quad (3.23)$$

$$\underline{\psi}_{r\beta} = \frac{\underline{i}_{s\beta} \cdot L_m + \underline{\psi}_{r\alpha} \cdot \omega \cdot T_r}{1 + pT_r}, \quad (3.24)$$

где $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ - коэффициент для постоянной времени для ротора.

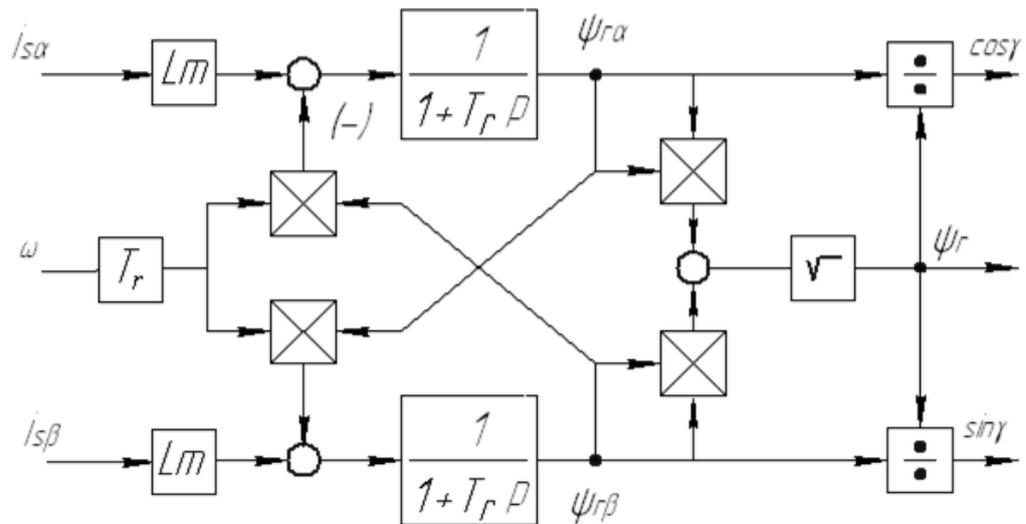


Рисунок 3.2 - Структурная схема разработанного наблюдателя за вектором потокосцепления ротора в неподвижной системе координат

Представленные выше модели наблюдателей для векторного управления асинхронных двигателей показывают идентичные результаты.

Запишем уравнения потокосцепления ротора, а также уравнения главного потокосцепления в асинхронном бездатчиковом электроприводе для определения переменных состояния, воспользуемся формулой (3.25)

$$\underline{\psi}_0 = \underline{\psi}_s - L_{\sigma s} \cdot \underline{i}_s, \underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\psi}_0 - L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_s;$$

или

$$\underline{\psi}_r = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{\psi}_s - L'_{\sigma} \cdot \underline{i}_s, \quad (3.25)$$

где $L'_{\sigma} = \left(\frac{L_{\sigma s}}{K_r} + L_{\sigma r} \right)$.

Продифференцируем уравнения (2.45) и получим формулу (3.26)

$$\frac{d\underline{\psi}_r}{dt} = \frac{1}{K_r} \cdot \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} - L'_{\sigma} \cdot \frac{d\underline{i}_s}{dt}. \quad (3.26)$$

Составим уравнение для вектора напряжения статора для асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат, воспользуемся формулой (3.27)

$$\underline{U}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt}. \quad (3.27)$$

После подстановки уравнения (3.36) в уравнение (3.37), получаем дифференциальное уравнение, которое позволяет произвести вычисления для потока сцепления ротора, представим это в формуле (3.28)

$$\frac{d\underline{\psi}_r}{dt} = \frac{1}{K_r} \cdot \underline{U}_s - \frac{R_s}{K_r} \cdot \underline{i}_s - L'_\sigma \cdot \frac{d\underline{i}_s}{dt}. \quad (3.28)$$

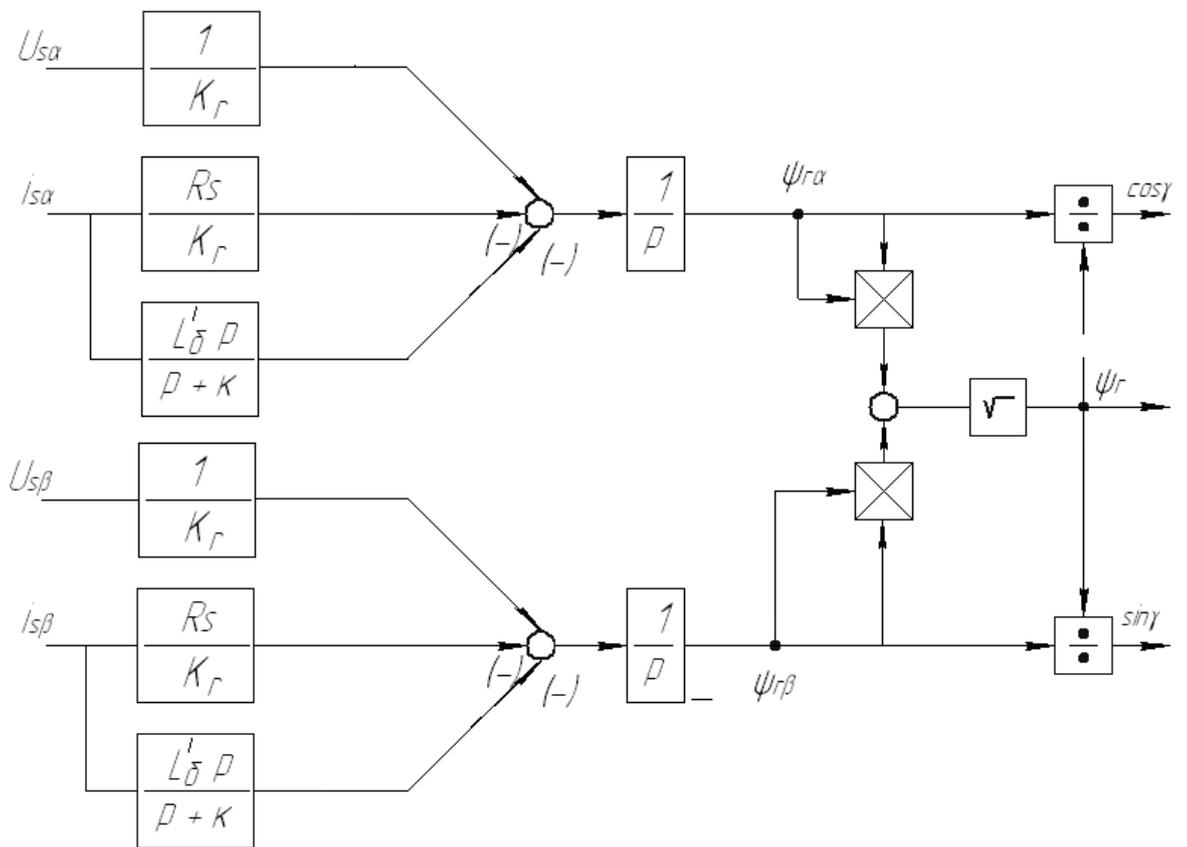


Рисунок 3.3 - Структурная схема наблюдателя в бездатчиковом электроприводе с асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором

В полученном уравнении содержится операция явного дифференцирования. Для упрощения расчета явное дифференцирование можно заменить при-

ближенным. После замены получается система уравнений для наблюдателя в неподвижной системе координат (α, β), воспользуемся формулой (3.29)

$$\left. \begin{aligned} p \cdot \psi_{ra}(p) &= \frac{1}{K_r} \cdot U_{s\alpha}(p) - \frac{R_s}{K_r} \cdot i_{s\alpha}(p) - \frac{L'_\sigma \cdot p}{p+k} \cdot i_{s\alpha}(p), \\ p \cdot \psi_{r\beta}(p) &= \frac{1}{K_r} \cdot U_{s\beta}(p) - \frac{R_s}{K_r} \cdot i_{s\beta}(p) - \frac{L'_\sigma \cdot p}{p+k} \cdot i_{s\beta}(p), \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

где k - коэффициент, который обеспечивает возможность произвести неявное дифференцирование.

Для того, чтобы объяснить процесс координатных преобразователей, вектор напряжения статорной цепи \underline{U}_s был взят, для того чтобы основой в качестве изображающего вектора. Вектор напряжения статорной цепи \underline{U}_s можно представить через проекции, которые проецируются на неподвижную систему координат (α, β), воспользуемся формулой (3.30)

$$\underline{U}_s = U_{s\alpha} + j \cdot U_{s\beta}. \quad (3.30)$$

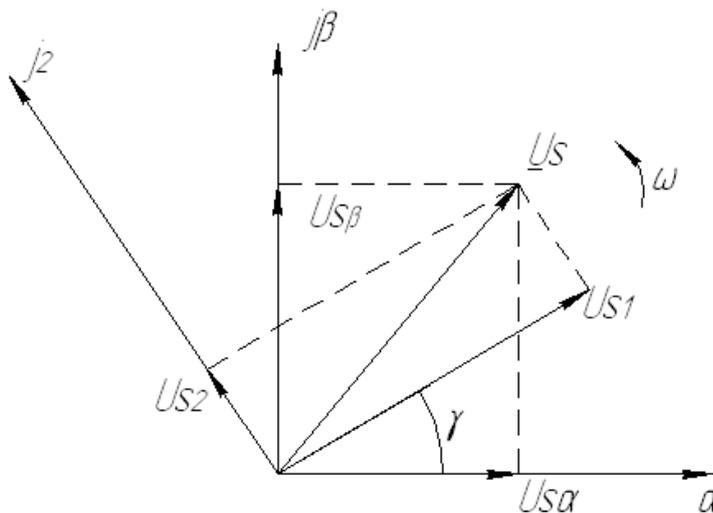


Рисунок 3.4 - Принцип преобразования координат

Выражение вектора напряжения для статорной цепи \underline{U}_s , используя систему вращающихся координат (1,2), которая связана с неподвижно системой координат (α, β) через угол $\gamma = \omega t$, будет иметь вид при использовании других проекций, воспользуемся формулой (3.31)

$$\underline{U}_s = U_{s1} + j \cdot U_{s2}. \quad (3.31)$$

Связь между проекциями координат, которые используются для изображающего вектора, установленная через векторную диаграмму, воспользуемся формулой (3.32)

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= U_{s1} \cdot \cos \gamma - U_{s2} \cdot \sin \gamma, \\ U_{s\beta} &= U_{s1} \cdot \sin \gamma + U_{s2} \cdot \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

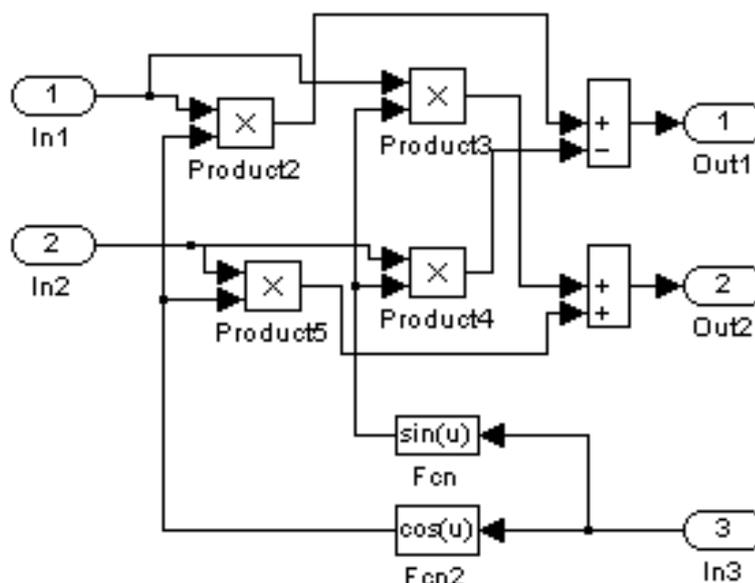


Рисунок 3.5 - Модель координатного преобразователя в системе MATLABSimulink

Математическая модель преобразователя координат представлена на рис.3.5. Данная модель производит преобразования координат по уравнению 3.32. Напряжения U_{s1} и U_{s2} , а также переменный угол $\gamma = \omega t$ (текущее время) являются входными параметрами во вращающейся системе координат. Напряжения в виде синусоидальных функций времени $U_{s\alpha}$ и $U_{s\beta}$ в неподвижной системе координат выходят из модели преобразователя координат.

Модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором выражена в относительных величинах. Данное действие позволяет упростить согласование системы управления и моделью.

Расчет базисных единиц:

1. Расчет базисных единиц тока напряжения и частоты вращения

$$U_{\varepsilon} = U_{\neq m} = \sqrt{2}U_H; \quad I_{\varepsilon} = I_{\neq m} = \sqrt{2}I_H; \quad (3.33)$$

$$\omega_{\varepsilon} = \omega_s = 2\pi \cdot f_1, \quad (3.34)$$

магнитного поля, воспользуемся формулой (3.33) и (3.34)

где U_H, I_H, f_H - номинальные значения напряжения, тока статора, а также частоты питания.

2. Расчет базисных единиц для момент, воспользуемся формулой (3.35)

$$M_{\varepsilon} = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{U_{\varepsilon} \cdot I_{\varepsilon}}{\omega_{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot p_n \cdot U_H \cdot I_H}{\omega_s}, \quad (3.35)$$

3. Расчет базисной единицы для времени, воспользуемся формулой (3.36)

$$t_{\varepsilon} = \frac{1}{\omega_{\varepsilon}}. \quad (3.36)$$

В качестве базисной единицы времени возьмем время, которое равно времени, за которое ротор сдвинется в результате вращения на один электрический радиан.

4. Расчет базисной единицы для сопротивления, воспользуемся формулой (3.37)

$$z_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{I_{\varepsilon}} = \frac{U_H}{I_H}. \quad (3.37)$$

5. Расчет базисной единицы для индуктивности, воспользуемся формулой (3.38)

$$L_{\varepsilon} = \frac{Z_{\varepsilon}}{\omega_{\varepsilon}} \quad (3.38)$$

6. Расчет базисной единицы для потокосцепления, воспользуемся формулой (3.39)

П

$$\psi_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{\omega_{\varepsilon}} \quad (3.39)$$

произведем ввод относительных значений для коэффициентов, а также для переменных асинхронного электродвигателя за счет деления реальных значений на базисные:

$$i_{r\alpha}^0 = \frac{I_{r\alpha}}{I_{\varepsilon}}, \quad i_{r\beta}^0 = \frac{I_{r\beta}}{I_{\varepsilon}}, \quad i_{S\alpha}^0 = \frac{I_{S\alpha}}{I_{\varepsilon}}, \quad i_{S\beta}^0 = \frac{I_{S\beta}}{I_{\varepsilon}} \quad - \text{относительные значения для токов}$$

ротора и статора;

$$U_{S\alpha}^0 = \frac{U_{S\alpha}}{U_{\varepsilon}} \quad \text{и} \quad U_{S\beta}^0 = \frac{U_{S\beta}}{U_{\varepsilon}} \quad - \text{относительные значения напряжений статора};$$

$$\psi_{r\alpha}^0 = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{\varepsilon}}, \quad \psi_{r\beta}^0 = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{\varepsilon}}, \quad \psi_{S\alpha}^0 = \frac{\Psi_{S\alpha}}{\Psi_{\varepsilon}}, \quad \psi_{S\beta}^0 = \frac{\Psi_{S\beta}}{\Psi_{\varepsilon}}, \quad \psi_0^0 = \frac{\Psi_0}{\Psi_{\varepsilon}} \quad - \text{относительные}$$

значения для потокосцеплений ротора, статора, а также воздушного зазора;

$$\mu = \frac{M}{M_B} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{\omega}{\omega_B} \quad - \text{относительные значения для электромагнитного мо-}$$

мента, а также угловой скорости ротора асинхронного электродвигателя;

$$\tau = \frac{t}{t_{\varepsilon}} = \omega_{\varepsilon} \cdot t \quad - \text{базисное (относительное) время.}$$

Запись относительных коэффициентов для ротора, статора, а также намагниченности:

$$r_s = \frac{R_s}{z_\theta}, \quad r_r = \frac{R_r}{z_\theta}, \quad x_s = \frac{\omega_\theta \cdot L_s}{z_\theta}, \quad x_r = \frac{\omega_\theta \cdot L_r}{z_\theta}, \quad x_m = \frac{\omega_\theta \cdot L_m}{z_\theta}, \quad H_j = \frac{J \cdot \omega_\theta^2}{M_\theta}. \quad (3.40)$$

Если поставить полученные относительные значения для коэффициентов и переменных, то также из базисных значений в систему уравнений (3.42), то можно получить уравнения для асинхронного электродвигателя в относительных единицах.

Составим уравнения для напряжений в машине в о.е. воспользуемся формулой (3.41)

$$\left. \begin{aligned} p \cdot \psi_{S\alpha}^0(p) &= U_{S\alpha}^0(p) - r_s \cdot i_{S\alpha}^0(p), \\ p \cdot \psi_{S\beta}^0(p) &= U_{S\beta}^0(p) - r_s \cdot i_{S\beta}^0(p), \\ p \cdot \psi_{r\alpha}^0(p) &= -r_r \cdot i_{r\alpha}^0(p) + p_n \cdot v(p) \cdot \psi_{r\beta}^0(p), \\ p \cdot \psi_{r\beta}^0(p) &= -r_r \cdot i_{r\beta}^0(p) - p_n \cdot v(p) \cdot \psi_{r\alpha}^0(p). \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Составим уравнения для токов, а также потокосцеплений в о.е. воспользуемся формулой (3.42)

$$\left. \begin{aligned} i_{S\alpha}^0(p) &= \frac{1}{x'_s} \cdot \psi_{S\alpha}^0(p) - \frac{K_r}{x'_s} \cdot \psi_{r\alpha}^0(p), \\ i_{S\beta}^0(p) &= \frac{1}{x'_s} \cdot \psi_{S\beta}^0(p) - \frac{K_r}{x'_s} \cdot \psi_{r\beta}^0(p), \\ i_{r\alpha}^0(p) &= \frac{1}{x'_r} \cdot \psi_{r\alpha}^0(p) - \frac{K_s}{x'_r} \cdot \psi_{S\alpha}^0(p), \\ i_{r\beta}^0(p) &= \frac{1}{x'_r} \cdot \psi_{r\beta}^0(p) - \frac{K_s}{x'_r} \cdot \psi_{S\beta}^0(p). \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

Составим уравнения для электромагнитного момента в о.е. воспользуемся формулой (3.43)

$$\mu = \frac{K_r}{x'_s} \cdot (\psi_{S\beta} \cdot \psi_{r\alpha} - \psi_{S\alpha} \cdot \psi_{r\beta}), \quad (3.43)$$

где $x'_r = \sigma \cdot x$, $x'_s = \sigma \cdot x_s$ - переходные индуктивные сопротивления ротора и статора в о.е.

Составим уравнения движения для ротора в о.е. воспользуемся формулой (3.44)

$$H_j \cdot p \nu = \mu - \mu_m, \quad (3.44)$$

где $\mu_m = \frac{M_c}{M_\phi}$ - относительный момент нагрузки.

Значения коэффициентов системы уравнений (3.33 -3.44) приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Значения коэффициентов системы уравнений

U_ϵ	I_ϵ	ω_ϵ	z_ϵ	M_ϵ	r_s	r_r	x_s
310	6,06	314	51,16	9,038	0,0697	0,0742	1,71
x_r	x_m	K_s	K_r	x'_s	x'_r	σ	H_j
1,774	1,612	0,9429	0,9087	0,2447	0,2538	0,1461	16,58

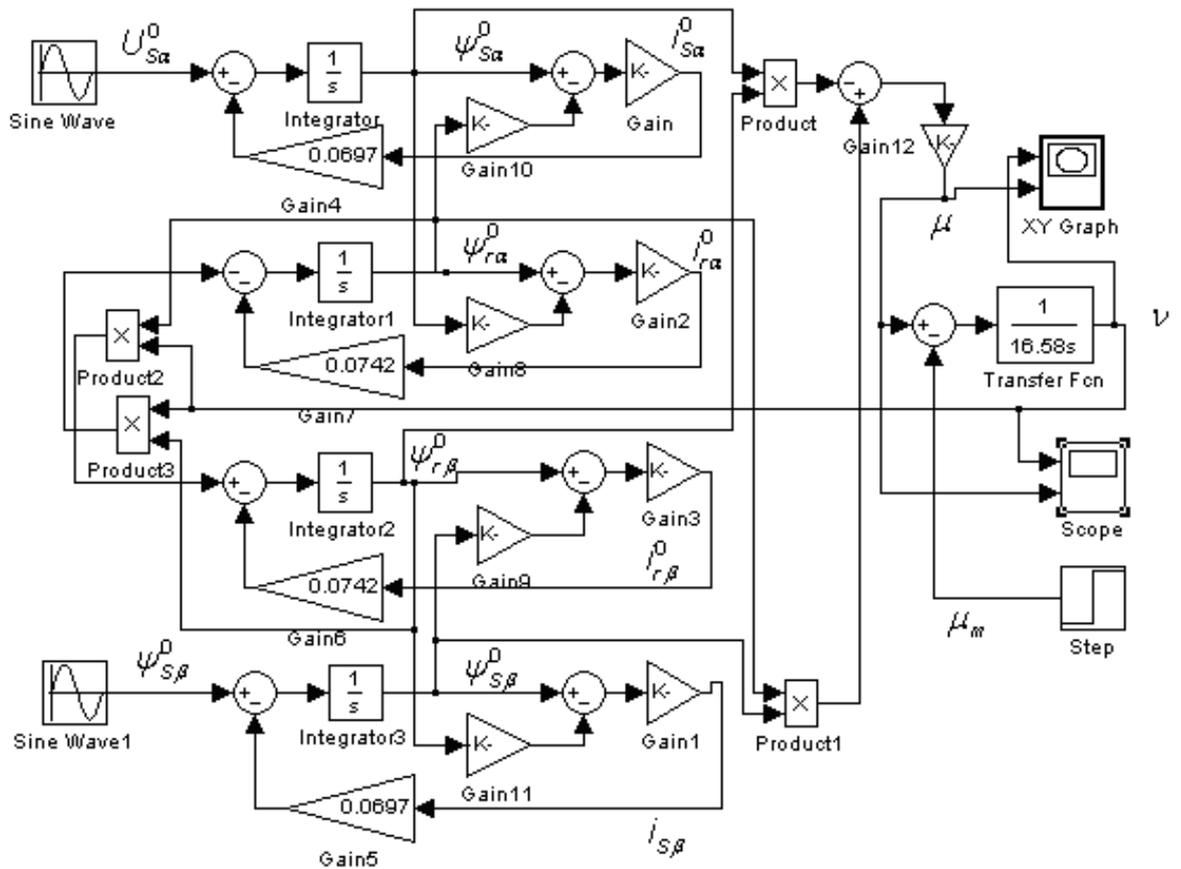


Рисунок 3.6 - Модель асинхронного электродвигателя собранная в относительных единицах и в неподвижной системе координат (а,В)

Модель асинхронного электродвигателя собранная в относительных единицах и в неподвижной системе координат показана на рис.3.6.

Напряжения $U_{Sa} = \cos t$, а также $U_{Sb} = \sin t$ - входные величины для собранной модели. Они задаются источниками Sine Wave, а также Sine Wave 1. Частота напряжений, а также их амплитуда соответствует 1. Параметры в блоках Gain и Gain 1 равны $1/x'_s$, а параметры в блоках Gain 2, а также Gain 3 равны $1/x'_s$. Коэффициент блока Gain 12 = $k_r x'_s$.

Изменение кривых по времени скорости вращения ротора, а также электромагнитного момента, представлено на диаграммах рис. 3.7.

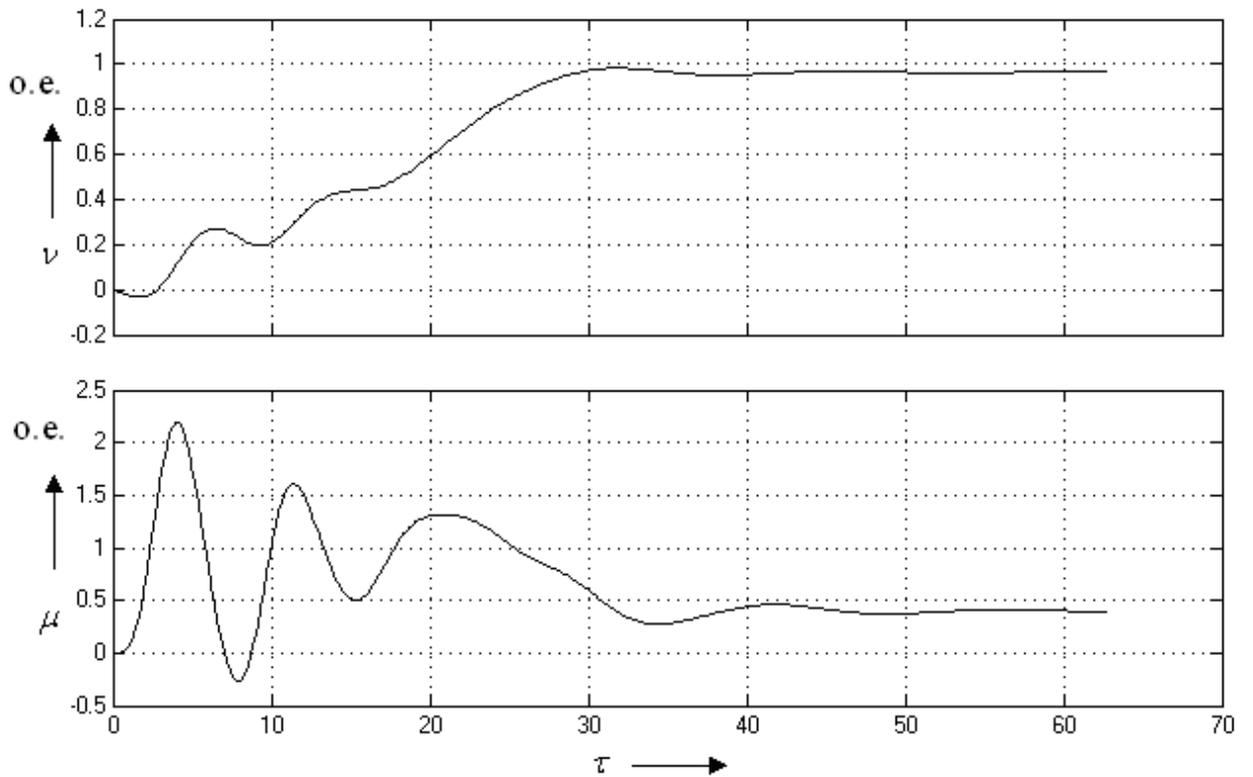


Рисунок 3.7 - Результаты моделирования асинхронного двигателя в неподвижной координатной системе α, β

3.3 Исследование рабочих режимов с учетом изменения параметров системы и действия возмущений

Осуществим расчёт параметров для Г – образной схемы асинхронного двигателя

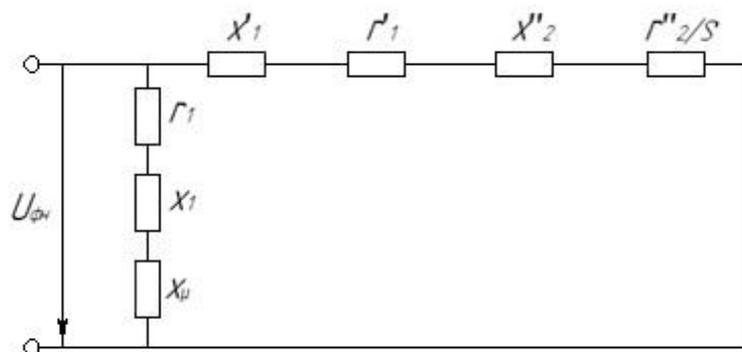


Рисунок 3.8 - Г – образная схема замещения асинхронного двигателя для номинального режима

По требуемым параметрам был взят двигатель 4А80В2У3.

Данные для асинхронного двигателя взятые из справочника:

Частота вращения синхронная – $n = 3000$ об/мин;

Количество пар полюсов – $p_n = 1$;

Значение номинальной мощности – $P_H = 2200$ Вт;

Коэффициент полезного действия КПД – $\eta = 0,83$;

Табличный коэффициент для мощности двигателя – $\cos \varphi_H = 0,87$;

Фазовое напряжение питания номинальное – $U_{\phi H} = 220$ В;

Число фаз обмотки статора – $m_1 = 3$;

Момент динамический инерции двигателя на валу ротора – $J = 0,00213$ кг · м²;

Коэффициент кратности для критического момента – $\lambda = 2,2$;

Значение номинального скольжения – $S_H = 5$;

$x'_{\mu} = 2,8$; $x'_1 = 0,054$; $r'_1 = 0,13$; $x''_2 = 0,084$; $r''_2 = 0,069$ – параметры схемы замещения для Г – образной схемы замещения асинхронного двигателя при номинальном режиме (рис. 3.8).

Расчет номинального фазного тока для статора, воспользуемся формулой

$$I_{\phi H} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta}, \quad (3.45)$$

$$I_{\phi H} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,83} = 4,616 \text{ А} \quad (3.45)$$

Расчет индуктивного сопротивления для обмотки статора в относительных единицах, воспользуемся формулой (3.46)

$$x_1 = \frac{2x'_1 \cdot x'_{\mu}}{x'_{\mu} + \sqrt{x'_{\mu}{}^2 + 4x'_1 \cdot x'_{\mu}}}, \quad (3.46)$$

$$x_1 = \frac{2 \cdot 0,054 \cdot 2,8}{2,8 + \sqrt{(2,8)^2 + 4 \cdot 0,054 \cdot 2,8}} = 0,053 \text{ о.е.}$$

Расчет активного сопротивления для обмотки статора в относительных единицах, воспользуемся формулой (3.47)

$$r_1 = r'_1 \cdot \frac{x_1}{x'_1}, \quad (3.47)$$

$$r_1 = 0,13 \cdot \frac{0,053}{0,054} = 0,128 \text{ о.е.}$$

Расчет коэффициента для перевода в физические единицы из относительных единиц, воспользуемся формулой (3.48)

$$c = \frac{U_{\Phi H}}{I_{\Phi H}}, \quad (3.48)$$

$$c = \frac{220}{4,616} = 47,660$$

Расчет активного сопротивления для статорной обмотки, воспользуемся формулой (3.49)

$$R_S = r_1 \cdot c, \quad (3.49)$$

$$R_S = 0,128 \cdot 47,660 = 6,101 \text{ Ом}$$

Расчет взаимной индуктивности для фаз ротора и статора, воспользуемся формулой (3.50)

$$L_m = \frac{x'_m \cdot c}{2\pi f}, \quad (3.50)$$

$$L_m = \frac{2,8 \cdot 47,660}{314} = 0,425 \text{ Гн}$$

Расчет полной индуктивности для фазы статора, воспользуемся формулой

$$L_S = \frac{(x'_m + x'_1) \cdot c}{2\pi f}, \quad (3.51)$$

$$L_S = \frac{(2,8 + 0,054) \cdot 47,660}{314} = 0,433 \text{ Гн} \quad (3.51)$$

Уточнение коэффициента для схемы замещения, воспользуемся формулой (3.52)

$$c_1 = \frac{x'_1}{x_1}, \quad (3.52)$$

$$c_1 = \frac{0,054}{0,053} = 1,019$$

Расчет активного сопротивления для обмотки ротора, воспользуемся формулой (3.53)

$$R_r = \frac{r''_2 \cdot c}{c_1^2}, \quad (3.53)$$

$$R_r = \frac{0,069 \cdot 47,660}{(1,019)^2} = 3,167 \text{ Ом}$$

Полная индуктивность фаз ротора, воспользуемся формулой (3.54)

$$L_r = \frac{(x'_\mu + \frac{x''_2}{c_1^2}) \cdot c}{2\pi f}, \quad (3.54)$$

$$L_r = \frac{(2,8 + \frac{0,084}{(1,019)^2})}{314} \cdot 47,660 = 0,437 \text{ Гн}$$

Коэффициент электромагнитной связи статора, воспользуемся формулой (3.55)

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}, \quad (3.55)$$

$$k_s = \frac{0,425}{0,433} = 0,982$$

Коэффициент электромагнитной связи ротора, воспользуемся формулой (3.56)

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (3.56)$$

$$k_r = \frac{0,425}{0,437} = 0,973$$

Коэффициент рассеяния обмоток, воспользуемся формулой (3.57)

$$\begin{aligned}\sigma &= (1 - k_s \cdot k_r), \\ \sigma &= (1 - 0,982 \cdot 0,973) = 0,045\end{aligned}\quad (3.57)$$

Переходная индуктивность статора, воспользуемся формулой (3.58)

$$\begin{aligned}L'_S &= L_S \cdot \sigma, \\ L'_S &= 0,433 \cdot 0,045 = 0,020 \text{ Гн}\end{aligned}\quad (3.58)$$

Переходное активное сопротивление статора, воспользуемся формулой (3.59)

$$\begin{aligned}R'_S &= R_S + k_r^2 \cdot R_r, \\ R'_S &= 6,101 + (0,973)^2 \cdot 3,167 = 9,099 \text{ Ом}\end{aligned}\quad (3.59)$$

Расчет индуктивного сопротивления для контура намагничивания, воспользуемся формулой (3.60)

$$\begin{aligned}x_\mu &= 2\pi f \cdot L_m, \\ x_\mu &= 314 \cdot 0,425 = 133,45 \text{ Ом}\end{aligned}\quad (3.60)$$

Расчет индуктивного сопротивления для рассеяния статора, воспользуемся формулой (3.1)

$$\begin{aligned}x_{S\sigma} &= 2\pi f \cdot (L_S - L_m), \\ x_{S\sigma} &= 314 \cdot (0,433 - 0,425) = 2,512 \text{ Ом}\end{aligned}\quad (3.61)$$

Расчет индуктивного сопротивления для рассеяния ротора, которое приведено к статору, воспользуемся формулой (3.62)

$$\begin{aligned}x'_{r\sigma} &= 2\pi f \cdot (L_r - L_m), \\ x'_{r\sigma} &= 314 \cdot (0,437 - 0,425) = 3,768 \text{ Ом}\end{aligned}\quad (3.62)$$

Постоянная времени ротора, воспользуемся формулой (3.63)

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad (3.63)$$

$$T_r = \frac{0,437}{3,167} = 0,138 \text{ с}$$

Постоянная времени статора, воспользуемся формулой (3.64)

$$T_s = \frac{L'_s}{R'_s}, \quad (3.64)$$

$$T_s = \frac{0,020}{9,099} = 0,002198 \text{ с}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания, воспользуемся формулой (3.65)

$$x_k = x_{S\sigma} + x'_{r\sigma}, \quad (3.65)$$

$$x_k = 2,512 + 3,768 = 6,28 \text{ Ом}$$

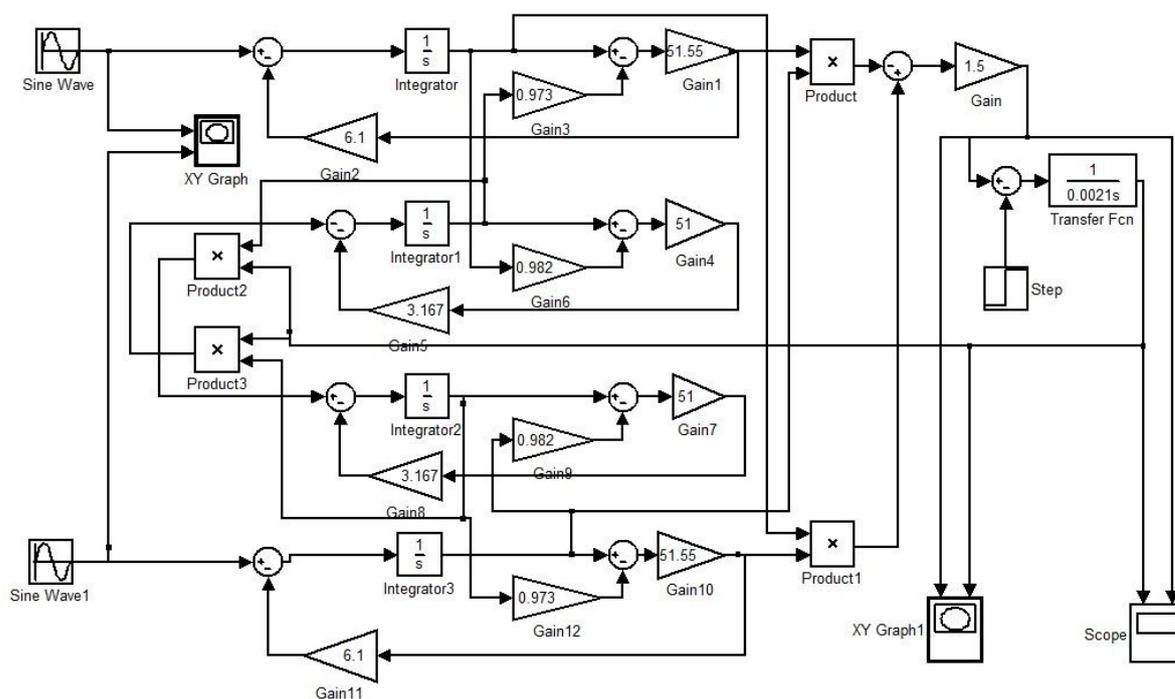


Рисунок 3.9 - Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат (α, β)

Произведем постройку модели асинхронного электродвигателя, используя уравнения 3.45 – 3.65 для неподвижной системы координат (α, β) . Данная схема представлена на рис. 3.9.

Источник Sine Wave генерирует сигналы, которые равны напряжениям $U_{S\alpha}$ и $U_{S\beta}$ воспользуемся формулой (3.67) для их записи

$$\begin{aligned}U_{S\alpha} &= U_m \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \cos \omega_0 t; \\U_{S\beta} &= U_m \cdot \sin \omega_0 t,\end{aligned}\tag{3.67}$$

где $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310\text{В}$ - амплитуда значений напряжений на входах; $\omega_0 = 314\text{с}^{-1}$ - круговая частота электромагнитного поля статора [17,26].

После открытия блока Sine Wave, в открывшихся параметрах требуется задать значение амплитуды равное 310, в поле круговой частоты 314 рад/сек, а в параметрах фазы колебаний указать 1,57 рад. После открытия блока Sine Wave 1 необходимо задать амплитуду в значении 310, параметр круговой частоты 314 рад/сек, а для фазы колебаний установить значение 0 рад. Активация настроек Sine Wave только после того, как источник сигнала будет перенесен в область работы для моделирования. Блоки Sine Wave отвечают за подачу двухфазного переменного напряжения на статорные цепи в асинхронном электродвигателе.

Блок Step создает на роторе электродвигателя момент сопротивления нагрузки.

Для Изучения процессов происходящих при работе асинхронного электродвигателя, который управляется по пропорциональному закону частотного регулирования, необходимы IGBT – инверторы для питания обмоток статора. Для их создания необходимо использовать в качестве основы гармонические колебания с возможностью регулирования частоты. Данная модель инвертора будет представлять идеальный преобразователь частоты без возникновения помех и отсутствия синусоидальных искажений.

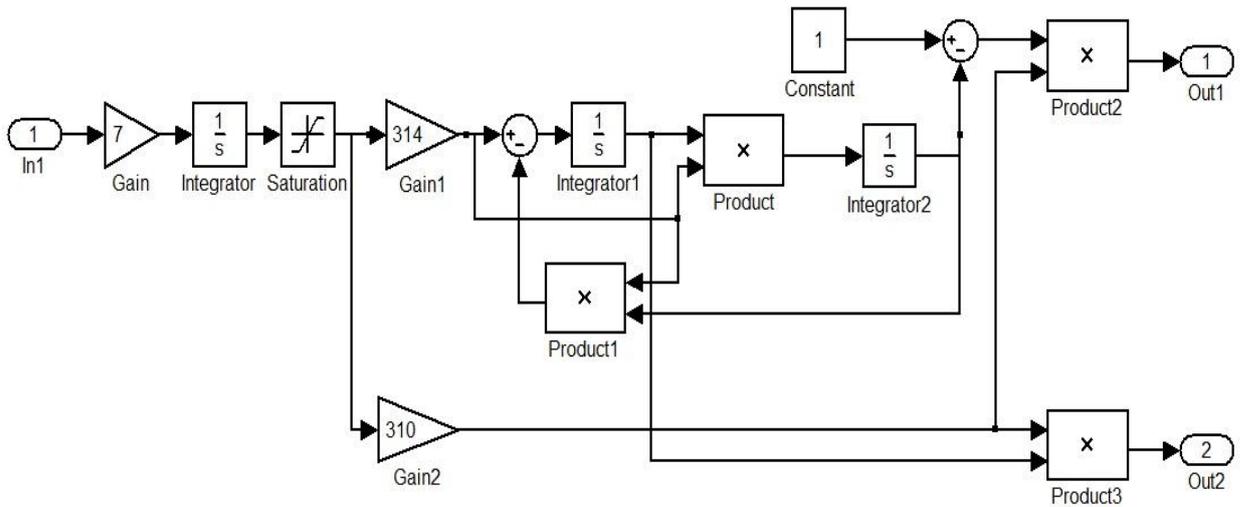


Рисунок 3.10 - Схема модели IGBT – Inverter

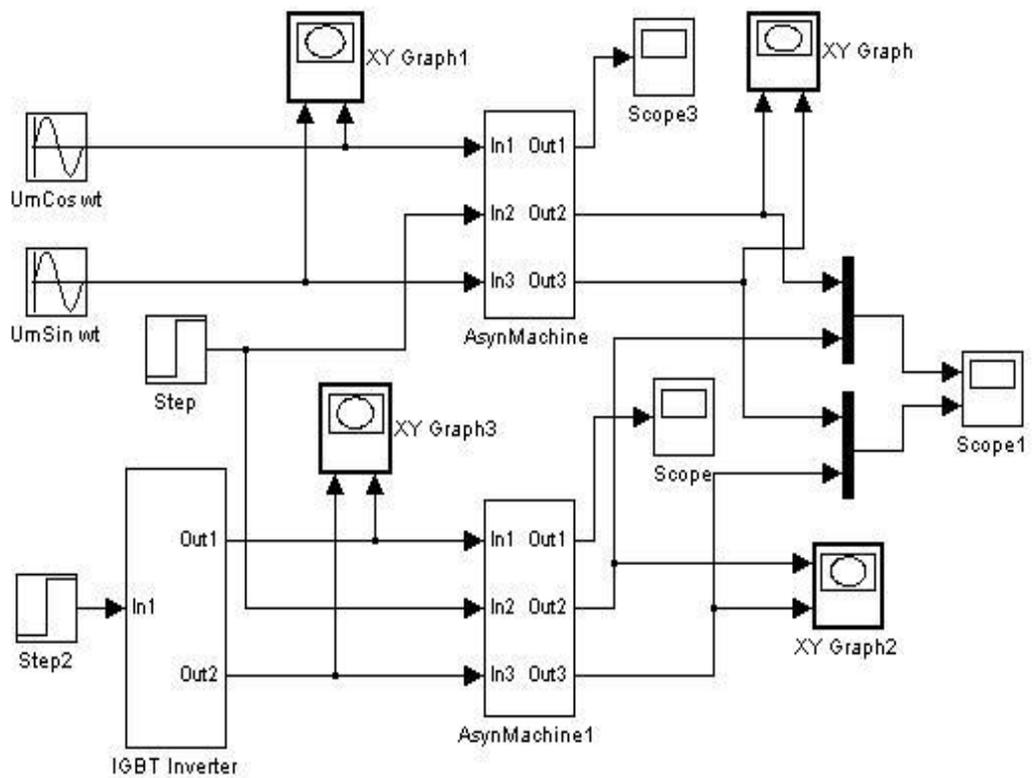


Рисунок 3.11 - Схема математического моделирования для асинхронного электродвигателя для сравнения пусков от частотного преобразователя и запуска напрямую от сети

Смоделированная схема IGBT – инвертора представлена на рис. 3.10. На данной схеме изменения значений частоты вращения ω_0 и напряжения U_m задается в задатчике интенсивности. Задатчик интенсивности состоит из интегратора Integrator, фильтра Saturation, а также усилителя Gain.

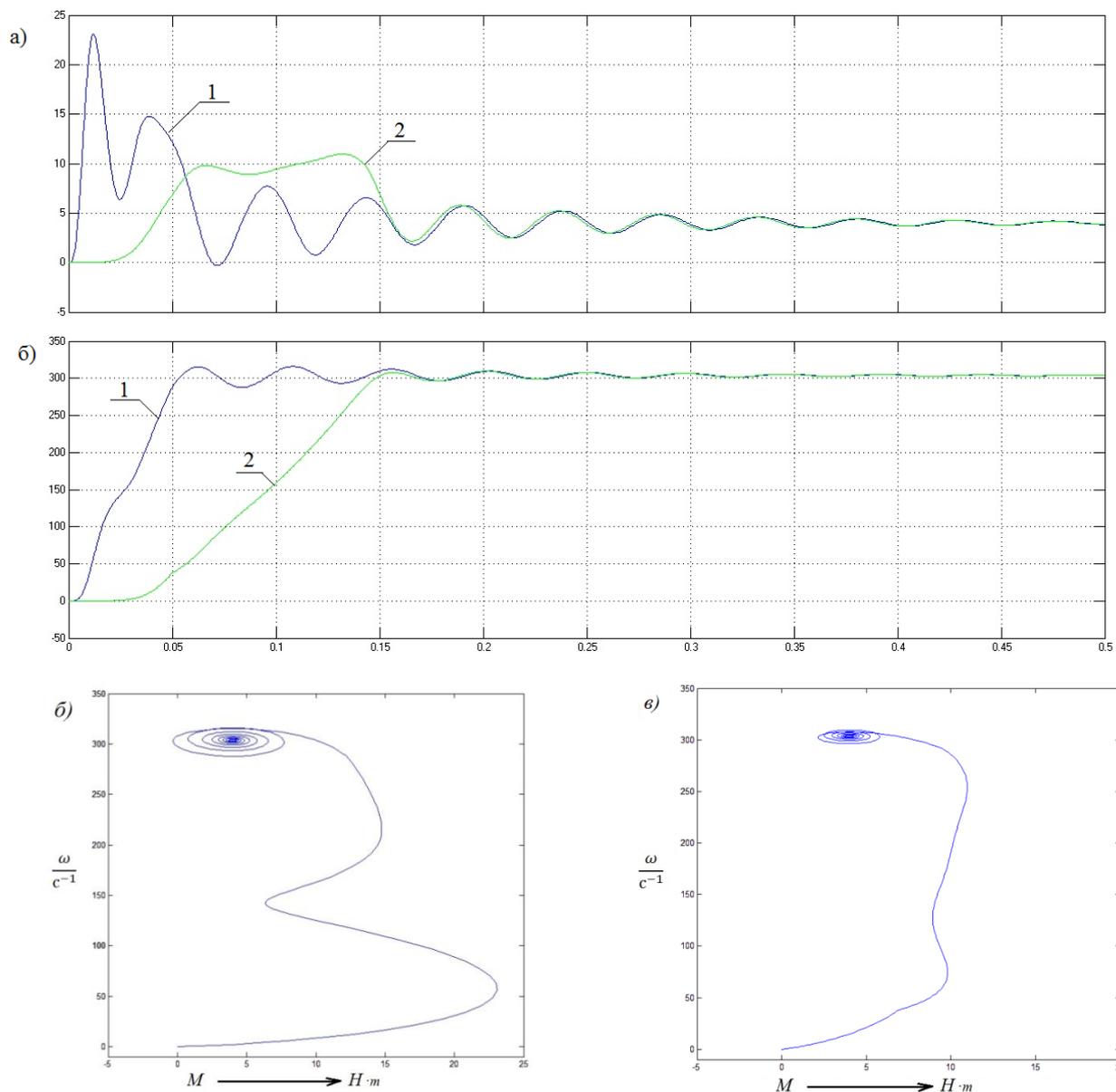


Рисунок 3.12 -Полученные результаты при моделировании процессов пуска для асинхронного электродвигателя

Схема математического моделирования для асинхронного электродвигателя для сравнения пусков от частотного преобразователя и запуска напрямую от сети представлена на рис 3.11. Данная схема содержит в себе 2 части. Данное решение позволяет одновременно проводить анализ, а также сравнительное исследование электромеханических процессов внутри двух электроприводов.

В верхней части модели моделирования, изображенной на рис 3.11, представлена свернутая модель асинхронного электродвигателя, содержит идеализированные источники питания $U_m \sin \omega_0 t$, а также $U_m \cos \omega_0 t$. Также в верхней части для получения графиков моделирования используется осциллограф Scope 3, а также 2 графопостроителя x_u Graph и x_y Graph 1. Верхняя часть схемы моделирует прямой пуск асинхронного электродвигателя и позволяет исследовать протекающие при этом электромеханические процессы.

В нижней части модели моделирования, представлена свернутая модель асинхронного электродвигателя Async Machine 1, идеальный преобразователь частоты IGBT – инвертор, осциллограф Scope, а также графопостроители x_u Graph 2 и x_y Graph 3. Нижняя часть моделирует пуск асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты при законе скалярного частотного управления, а также позволяет исследовать протекающие при этом электромеханические процессы.

На вход In1 в блоке IGBT – инвертора подается управляющий сигнал, который имеет форму единичного ступенчатого воздействия. Осциллограф Scope 1 используется для получения диаграмм при различных видах пуска асинхронного электродвигателя, а также дальнейшего их анализа. В модель Async Machine на вход In1, а также In2 подаются соответствующие сигналы $U_{S\alpha}$, и $U_{S\beta}$. Сигнал момента сопротивления нагрузки подается на вход In2. С выхода свернутой модели электродвигателя Out 1 выходит ток, который равен току фазы A, $I_{S\alpha}$. Электромагнитный момент снимаем с выхода Out 2. Угловую скорость вращения ротора ω снимает с выхода Out 3.

Полученные осциллограммы, которые показывают изменение электромагнитного момента $M_{\text{э}}$, а также угловая скорость ω вращения ротора представлены в нижней части рис. 3.12.

На верхней части рис. 3.12. представлены кривые для частотного, а также прямого пусков. Цифрой 1 обозначена кривая прямого пуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, а под цифрой 2 – частотный пуск при реализации пропорционального скалярного закона частотного управления $U_s/F_s = \text{const}$.

После анализа полученных диаграмм, при пуске асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты не наблюдаются ударный пусковой момент, также снижен начальный пусковой ток. Так же при данном пуске наблюдается поддержание на одном уровне электромагнитного момента $M_{\text{э}}$, что обеспечивает постоянство динамического момента, а также плавность разгона электродвигателя.

После проведенного сравнения динамических характеристик $\omega=f(M)$ для двух видов пуска асинхронного электродвигателя можно сделать вывод, что использования частотного пуска позволяет добиться более постоянного момента в отличии от прямого пуска.

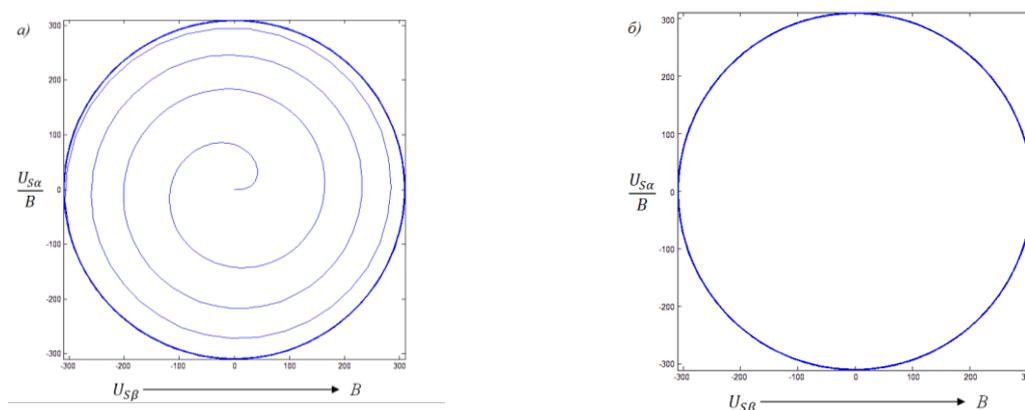


Рисунок 3.13 - Полученные годографы изменения векторов статорного напряжения: а – при пропорциональном частотном пуске от преобразователя частоты; б – при прямом пуске

Годографы полученные в результате моделирования представлены на рис.3.13. и были получены при использовании блока ху Graph. Напряжение U_{sa} подключено на вход блока х. Напряжение U_{sb} подается на вход у. Также в параметрах блока ху Graph необходимо указать максимальное и минимальное значение х и у, которое равно 310.

После анализа полученных годографов, отображающих изменение вектора статорного напряжения при прямом, а также при частотном пуске, наблюдается постепенное закручивание спирали при скалярном частотном пуске (рис. 3.13а) и переходящем в дальнейшем в окружность. Это объясняется тем, что амплитуда и напряжение на статоре асинхронного электродвигателя изменяются пропорционально за весь процесс пуска.

3.4 Выводы

При моделировании при прямом пуске и при использовании векторного управления можно сделать заключение:

1. При прямом пуске наблюдается большой пусковой ток, чего не видно при векторном управлении.
2. Незначительно увеличивается время переходного процесса.
3. Уменьшается потребление электроэнергии в начальный момент времени.
4. Векторная модель асинхронного электропривода имеет высокую точность, а также более высокую стоимость.

Одним из важных недостатков использования векторного управления в асинхронных электроприводах – невозможность поддержания нужного момента при низких скоростях, что вызывает обращение к альтернативным структурам управления. Но для работы портала балансировочной машины этого не требуется.

Заключение

После анализа, проведенного над теоретическими исследованиями и математическим моделированием системы на базе управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем с векторным управлением, были решены поставленные задачи, а также сформулированы следующие результаты:

1. Оптимизация векторного управления является одной из главных задач при моделировании. Она обеспечивает большие возможности при исследовании динамических режимов при стабилизации постоянного магнитного потока. Большое увеличение мощности ЭВМ и их распространение в настоящее время дает возможность провести математическое моделирование изменения параметров асинхронного электродвигателя при различных режимах работы. Все это наглядно показывает, что для создания системы электроприводов на базе асинхронного электродвигателя, который работает с переменной нагрузкой, требуется векторное управление со стабилизацией магнитного потока.

2. В результате анализа динамических процессов, которые происходят в асинхронном двигателе, при выборе координатной системы для математического моделирования, оптимальным является выбор координатной системы (α, β) . При использовании данной координатной системы упрощается процесс математического моделирования и получение различных характеристик, можно создать системы, которые показывают, что привод работает с высокими энергетическими показателями. При добавлении разработанного наблюдателя математической модели создается возможность реализовать исследования асинхронного электропривода, исключив при этом датчики состояния.

3. Разработанная функциональная схема управления с частотно-векторным управлением на базе преобразователя частоты фирмы Siemens – Sinumeric S120 для асинхронного электропривода портала балансировочной машины позволяет достичь высоких энергетических показателей, а также высокого быстродействия для механизмов, работающих при переменной нагрузке. Это позволило создать математическую, а также структурную модель

управления портала. На основе разработанной модели появилась возможность получить исследования электромеханических процессов и данных координат движения портального манипулятора. Анализ при изучении данных статических и динамических параметров асинхронного двигателя привода портала подтвердил стабильную работу асинхронного электродвигателя при различных режимах работы, что позволяет говорить о высоких показателях КПД.

Список использованных источников

1. Крылов Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод: Учеб. пособие/ Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев – Москва: Лань, 2013. -176 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. для вузов/ В.В. Москаленко – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 363 с.
3. Кисаримов Р.А. Электропривод: справочник/ Р.А. Кисаримов – Москва: ИП Радио Софт, 2014. – 350 с.
4. Мурадова Е.О. Безопасность жизнедеятельности: Учеб.пособие/ Е.О. Мурадова – Москва: Научная книга, 2013. – 60 с.
5. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропровода: учеб. для вузов / Б.Ю. Васильев – Москва: Солон-Пресс, 2015. - 267 с.
6. Фролов Ю. М. Проектирование электропривода промышленных механизмов: Учеб. пособие/ Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин – Москва: Лань, 2014. - 446 с.
7. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков - Москва: Энергия, 2013. - 496 с.
8. Гаррис М. Н. Системы относительных единиц в теории электрических машин: Пер. с англ./ М. Н. Гаррис - Москва.: Энергия, 2015. - 120 с.
9. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины/ М. П. Левинштейн, А. А. Суханов. - Ленинград: Наука,2014.-502с.
10. Грузов Л. Н. Методы математического исследования электрических машин. - Москва: Госэнергоиздат, 2013. - 264 с.
11. Данилевич Я. Б. Параметры электрических машин переменного тока/ Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский - Москва: Наука, 2012. - 340 с.

12. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2015. - 373 с.
13. Асташев, В.К. Машиностроение. Энциклопедия. В 40-и т. Электропривод. Гидро- и виброприводы. Т.IV-2. Гидро- и виброприводы. Книга 2 / В.К. Асташев. - Москва: Машиностроение, 2012. - 304 с.
14. Бекишев, Р.Ф. Электропривод: Учебное пособие для академического бакалавриата / Р.Ф. Бекишев, Ю.Н. Дементьев. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 301 с.
15. Васильев, Б.Г. Электропривод. Энергетика электропривода: Учебник / Б.Г. Васильев. - Москва: Солон - пресс, 2015. - 268 с.
16. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б.Ю. Васильев. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2015. - 268 с.
17. Денисов, В.А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением: Учебное пособие / В.А. Денисов. - Ст. Оскол: ТНТ, 2013. - 164 с.
18. Епифанов, А.П. Электропривод: Учебник / А.П. Епифанов, Л.М. Милайчук, А.Г. Гущинский. - СПб.: Лань, 2012. - 400 с.
19. Епифанов, А.П. Электропривод / А.П. Епифанов. - СПб.: Лань, 2012. - 400 с.
- Епифанов, А.П. Электропривод: Учебник / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гущинский. - СПб.: Лань, 2012. - 400 с.
20. Кисаримов, Р.А. Электропривод / Р.А. Кисаримов. - М.: Радио и связь, 2012. - 352 с.
21. Кисаримов, Р.А. Электропривод: Справочник / Р.А. Кисаримов. - М.: РадиоСофт, 2012. - 352 с.
22. Козырев, А.А. Машиностроение. Энциклопедия. В 40-и т. Электропривод. Гидро- и виброприводы. Т.IV-2. Электропривод. Книга 1 / А.А. Козырев. - М.: Машиностроение, 2012. - 520 с.
23. Крылов, Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропри-

вод: Учебное пособие / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. - СПб.: Лань, 2013. - 176 с.

24. Курбанов, С.А. Основы электропривода: Учебное пособие / С.А. Курбанов, Д.С. Магомедова. - СПб.: Лань П, 2016. - 192 с.

25. Масандилов, Л.Б. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. 4-2. Электропривод. Гидро- и виброприводы. В 2-х кн. Кн. 1 Электропривод / Л.Б. Масандилов. - М.: Машиностроение, 2012. - 520 с.

26. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: Учебник / В.В. Москаленко. - М.: ИНФРА-М, 2012. - 208 с.
Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода / В.В. Москаленко. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2016. - 208 с.

27. Никитенко, Г.В. Электропривод производственных механизмов: Учебное пособие / Г.В. Никитенко. - СПб.: Лань, 2013. - 224 с.

28. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: Учебное пособие по специальностям "Электромеханика" и "Электропривод и автоматика" / М.Я. Хитерер. - СПб.: КОРОНА - принт, 2013. - 368 с.

29. Шабанов, В.А. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов и технологического режима перекачки при кратковременных нарушениях электроснабжения / В.А. Шабанов, В.Ю. Алексеев, З.Х. Павлова. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2012. - 172 с.

30. Юдович, В.И. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод: Учебное пособие / В.И. Юдович. - СПб.: Лань, 2013. - 176 с.

Юнусов, Г.С. Электропривод производственных механизмов: Учебное пособие / Г.С. Юнусов, А.В. Михеев, М.М. Ахмадеева. - СПб.: Лань, 2013. - 224 с.

31. Якуничева, О.Н. Проектирование электропривода промышленных механизмов: Учебное пособие / О.Н. Якуничева, А.П. Прокофьева. - СПб.: Лань, 2014. - 448 с.

32. Яни, А.В. Регулируемый асинхронный электропривод: Учебное пособие / А.В. Яни. - СПб.: Лань, 2016. - 464 с.
33. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables/ [Electronic resource] https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/05/mateconf_smart2017_01039/mateconf_smart2017_01039.html Published 20 December 2016
34. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control/ [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/statistical-optimization-of-frequency-regulated-induction-electric-drives-with-scalar-control> Published 2017
35. A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/a-method-for-determining-location-of-voltage-fluctuations-source-in-electric-grid> 2016 Published 2016
36. Three-phase energy supply systems simulation for the total power losses components assessment / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/three-phase-energy-supply-systems-simulation-for-the-total-power-losses-components-assessment> Published 2016
37. An induction sensor for measuring currents of nanosecond range / [Electronic resource] <https://cyberleninka.ru/article/v/an-induction-sensor-for-measuring-currents-of-nanosecond-range> Published 2016