

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Робототехника и техническая кибернетика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г.Б.Масальский

подпись

инициалы, фамилия

« 22 » июня 2017 г

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Идентификация параметров асинхронного двигателя на основе
Micromaster

Руководитель

Смолев 22.06.17

подпись, дата

доц. к.т.н. А. П. Смольников

должность, учёная степень

Выпускник

Каширская 22.06.17

подпись, дата

Я. С. Каширская

Нормоконтролёр

Куликова 22.06.17

подпись, дата

В. Н. Куликова

Красноярск 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Робототехника и техническая кибернетика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г.Б.Масальский

подпись

инициалы, фамилия

« 24 » апреля 2017 г

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

					БР - 15.03.06 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Каширская Я.С.			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Смольников А.П.				3	
Н. Контр.		Куликова В.Н.			ПИ СФУ ФЭ13-08Б		
Утв.		Масальский Г.					

Студенту Каширской Яне Сергеевне

Группа ФЭ 13-08Б Направление (специальность) 15.03.06

«Мехатроника и робототехника»

Тема выпускной квалификационной работы «Идентификация параметров асинхронного двигателя на основе Micromaster»

Утверждена приказом по университету 2409/с от 27.02.17г

Руководитель ВКР А. П. Смольников, кафедра РИТК, к. т. н., доцент

Исходные данные для ВКР

1. Асинхронный двигатель АИР90L6У3
2. Частотный преобразователь Micromaster 440
3. Пакет программного обеспечения STARTER
4. Пакет программного обеспечения MATLAB R2008b

Перечень разделов ВК

Глава 1 – Идентификация система

Глава 2 – Математическое описание асинхронного двигателя

Глава 3 – Определение параметров схемы замещения

Глава 4 – Идентификация параметров электродвигателя

Глава 5 – Система управления электропривода с учетом идентифицируемых параметров

Глава 6 – Экономическая часть

					БР - 15.03.06 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Каширская Я.С.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Смольников А.П.					3	
Н. Контр.	Куликова В.Н.				ПИ СФУ ФЭ13-08Б		
Утв.	Масальский Г.						

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов, слайдов

Лист 1 – Математическая модель асинхронного двигателя

Лист 2 – Т-образная схема замещения

Лист 3 – Данные асинхронного двигателя с шильдика

Лист 4 – Сравнительная таблица рассчитанных параметров и определенных частотным преобразователем

Лист 5 – Структурная схема с векторным управлением

Руководитель ВКР

А. П. Смольников

подпись

Задание принял к исполнению

Я. С. Каширская

подпись

«24» апреля 2017 г.

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
						4
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Идентификация параметров асинхронного двигателя на основе Micromaster» содержит 72 страниц текстового материала, 22 иллюстрации, 18 таблиц, 48 формул, 12 использованных источников.

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ЧАСТОТНИК, MICROMASTER, ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.

Цели работы:

- построить математическую модель асинхронного двигателя;
- выбрать схему замещения;
- рассчитать параметры схемы замещения;
- определить параметры схемы замещения через частотный преобразователь;
- провести сравнительный анализ результатов;
- выполнить полную параметризацию асинхронного двигателя;
- рассмотреть векторное управление асинхронным двигателем.

В ходе дипломного проектирования были освоены методы идентификации, изучены схемы замещения, выполнен расчет параметров схемы замещения.

Изучен пакет ПО STARTER, в котором выполнена полная параметризация асинхронного двигателя, определение параметров схемы замещения.

Рассмотрено векторное управление асинхронным электродвигателем, с учетом определенных параметров.

					<i>БР – 15.03.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. Идентификация систем	9
1.1. Подходы к идентификации	10
1.2. Методы динамической идентификации	11
1.3. Понятие схемы замещения	13
1.4. Постановка задачи	14
2. Математическое описание асинхронного двигателя	16
2.1. Математическая модель асинхронного двигателя	16
2.2. Определение параметров асинхронного двигателя	20
3. Определение параметров схемы замещения	23
3.1. Схема замещения асинхронного двигателя	23
3.2. Характеристики двигателя	25
3.3. Определение параметров схемы замещения традиционным способом	26
3.3.1. Вычисления с помощью MATLAB	29
4. Идентификация параметров электродвигателя	35
4.1. Настройка базовой конфигурации привода	35
4.2. Определение параметров схемы замещения с применением частотного преобразователя	39
4.3. Сравнение параметров	42
4.4. Вычисление данных двигателя и данных системы управления	43
5. Система управления электропривода с учетом идентифицируемых параметров	49
5.1. Векторное управление	49
5.2. Классификация методов векторного управления	50
5.2.1. Линейные регуляторы момента	51
5.2.1.1. Полеориентированное управление	51

5.2.1.2. Прямое управление вектором с пространственно-векторной модуляцией напряжения	53
5.2.2. Нелинейные регуляторы момента	54
5.2.2.1. Прямое управление моментом	55
5.2.2.2. Прямое самоуправление	57
5.3. Структурные схемы замкнутых асинхронных машин с векторным управлением	58
5.3.1. Частотная асинхронная системы с векторным управлением	65
5.3.2. Частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением	68
6. Экономическая часть	68
6.1. Расчет комплексного показателя технического уровня	71
6.2. Расчет затрат на производство и эксплуатацию	72
6.3. Расчет цены оборудования с учетом ККТУ	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	79

ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокотехнологичных отраслей производства невозможно без внедрения в производственный процесс электроприводов и устройств повышенной точности. Электропривод, будучи одним из ключевых звеньев любого производственного комплекса, должен жестко соответствовать заранее определенным критериям качества. Поэтому очень важной задачей в условиях современных предприятий является наличие интеллектуальной системы с целью мониторинга текущего состояния электрооборудования и диагностирования дефектов.

Преобразователи частоты обеспечивают оптимальную работу электропривода в технологическом процессе, а также многофункциональную связь с внешними элементами и системами управления

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

1 Идентификация систем

Начало идентификации систем, как предмета построения математических моделей на основе наблюдений, связывают с работой Карла Фридриха Гаусса, в которой он использовал метод наименьших квадратов для предсказания траектории движения планет. Впоследствии этот метод нашёл применение во множестве других приложений, в том числе и для построения математических моделей управляемых объектов, используемых в автоматизации.

Приблизительно до 50-х годов XX века, большая часть процедур идентификации в автоматике, основывалась на наблюдении реакций управляемых объектов при наличии некоторых управляющих воздействий: ступенчатое, гармоническое, сгенерированный цветной либо белый шум, и в зависимости от того какой вид информации использовался об объекте, методы идентификации делились на частотные и временные. Проблема заключалась в том, что область приложений этих методов была ограничена чаще всего скалярными системами (SISO, Single-input, single-output). В 1960 году Рудольф Калман представил описание управляемой системы в виде пространства состояний, что позволяло работать и с многомерными (MIMO, Many-input, many-output) системами, и заложил основы для оптимальной фильтрации и оптимального управления, основывавшихся на данном типе описания.

Конкретно для задач управления, методы идентификации систем были разработаны в 1965 году в работах Хо и Калмана, Острёма и Болина. Эти работы открыли путь разработке двух методов идентификации, популярных до сих пор: методу подпространства и методу ошибки предсказания. Первый основан на использовании проекций в евклидовом пространстве, а второй на минимизации критерия, зависящего от параметров модели.

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

1.1 Подходы к идентификации

При идентификации предполагается экспериментальное изучение и сопоставление входных и выходных процессов, и задача идентификации состоит в выборе соответствующей математической модели. Модель должна быть такой, что её реакция и реакция объекта на один и тот же входной сигнал должны быть близкими по значению. Результаты решения задачи идентификации являются исходными данными для проектирования систем управления, оптимизации, анализа параметров систем.

Статические математические модели систем получают тремя способами: экспериментально-статистическими, детерминированными и смешанными [1].

Экспериментально-статистические способы [1] требуют проведения активных или пассивных экспериментов на действующем объекте. Стохастические модели используют для решения задач, связанных с исследованием и управлением процессами. В большинстве случаев эти модели получают в виде линейных уравнений регрессии.

Детерминированные модели [1] составляют «на основании физических закономерностей и представлений о процессах». Следовательно, их можно получать еще на стадии проектирования процесса. В настоящее время на базе детерминированного подхода разработано несколько методов построения математических моделей непрерывных процессов. Так, например, при математическом моделировании ряда процессов в химической технологии применяется метод многомерного фазового пространства. Сущность метода заключается в том, что протекание моделируемого технологического процесса рассматривается как движение некоторых «изображающих точек» в многомерном фазовом пространстве. Это пространство определено как пространство декартовой системы координат, по осям которого отложены пространственные координаты аппарата и внутренние координаты реагирующих твердых частиц. Каждая точка в многомерном фазовом пространстве описывает определенное состояние

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

моделируемого процесса. Число этих точек равно числу частиц в аппарате. Протекание технологического процесса характеризуется изменением потока изображающих точек.

1.2 Методы динамической идентификации

Для эффективного управления, технической диагностики и защиты от аварийных режимов необходимо знание текущих значений параметров и переменных состояния характеризующих работу технологической установки, доступ к которым порой затруднен или невозможен.

Для электродвигателей такими параметрами являются активные и индуктивные сопротивления обмоток, взаимная индуктивность обмоток, момент инерции, электромагнитный момент и момент сопротивления, угловая скорость вращения. Получение данной информации в реальном времени возможно с помощью процедур динамической идентификации, выполняемых наблюдающими устройствами, работа которых основана на использовании математической модели идентифицируемого объекта, математических методов оценивания, а также информации содержащейся в напряжениях и токах обмоток двигателя, измеряемых в процессе его работы.

Основными методами оценивания параметров динамических систем являются: метод наименьших квадратов, рекуррентный метод наименьших квадратов, фильтр Калмана, поисковые методы, эволюционные алгоритмы, методы роевого интеллекта [2].

Метод наименьших квадратов [2] является одним из наиболее разработанных и распространенных методов оценивания. Метод наименьших квадратов минимизирует сумму квадратов значений ошибки, независимо от ее происхождения, определяемой как разность между выходными сигналами системы и ее математической модели. Анализ характеристик позволяет сделать вывод о его применимости для оценки параметров в реальном времени, однако наблюдается

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

небольшая задержка, зависящая от частоты дискретизации, вызванная необходимостью заполнения массивов наблюдаемых переменных (100 – 500 значений). Метод обладает хорошей устойчивостью к шумам в измерительной системе.

Рекуррентный метод наименьших квадратов [2] позволяет в реальном масштабе времени вычислять новую оценку параметров, если известны предыдущая оценка и ковариационная матрица ошибок оценки параметров. Анализ полученных характеристик показывает максимально высокое быстродействие метода, определяемое величиной шага дискретизации. Однако сходимость метода и его точность в значительной степени зависят от начального приближения к оцениваемым параметрам, а также от уровня зашумления измерительных данных. В статических режимах работы двигателя процесс оценки параметров является неустойчивым.

Фильтр Калмана [2] позволяет определить состояние системы при известной структуре ее динамической модели в условиях неполной информации и зашумленных данных. Важным достоинством фильтра Калмана является его способность одновременно с вектором параметров определять вектор состояния динамического объекта – электрический ток в обмотках. Однако настройка фильтра, качество которой определяет точность оценивания параметров, является трудоемким эмпирическим процессом. Кроме того, требуется также знание ковариационных матриц погрешности измерения и возмущения, получение которых в некоторых случаях может быть затруднительным, либо оказаться неточным. В случае правильной настройки фильтр Калмана позволяет оценивать параметры двигателя в реальном времени с погрешностью до 15%.

Полный перебор [2] – метод решения задачи путем перебора всех комбинаций параметров в заданном диапазоне, с запоминаем тех из них, при которых ошибка будет минимальна. Время работы алгоритма полного перебора экспоненциально зависит от количества искомых параметров. Метод обладает исключительно хорошей устойчивостью к шумам в полезном сигнале, позволяет

находить глобальный экстремум, однако относительно большое время оценивания (100-200 с.) затрудняет его использование в системах реального времени.

Генетический алгоритм [2] – это эволюционный алгоритм поиска, применяемый для решения задач оптимизации. Он позволяет находить достаточно точное решение за меньшее время, чем при использовании алгоритма полного перебора. Точность оценивания параметров при этом зависит от количества поколений, а также от настроек алгоритма. Время процесса оценивания параметров определяется требуемой точностью.

Метод роя частиц [2] относится к методам искусственного интеллекта. Он позволяет имитировать коллективное поведение элементов децентрализованной самоорганизующейся системы. Точность определения и время вычисления параметров с помощью метода роя частиц зависит от его настроек, объема выборки измеряемых данных и диапазона поиска. При этом диапазон поиска может динамически изменяться: на первых этапах он максимален, в дальнейшем может быть существенно сокращен, тем самым будет уменьшено время вычисления.

1.3 Понятие схемы замещения

Схема замещения реального элемента цепи - электрическая схема цепи, состоящая из идеализированных элементов цепи, рассчитанные напряжения и токи на зажимах которой совпадают с какой-то погрешностью с измеренными токами и напряжениями на зажимах реального элемента. Уравнения для токов и напряжений эквивалентной схемы реального элемента являются его математической моделью.

Одной из основных задач электроники является расчет электрических цепей. Однако рассчитать произвольную цепь, состоящую из реальных электронных компонент, практически невозможно. Мешает расчету то обстоятельство, что попросту не существует методик математического описания поведения реальных электронных компонентов как единого целого. Имеются значения отдельных параметров и экспериментально снятые зависимости, но связать их в единую

точную формулу, полностью описывающую поведение компоненты, в большинстве случаев не представляется возможным.

Введение понятия схема замещения позволяет «связать» мир реальных компонентов и мир их идеальных приближений. Схема замещения представляет собой цепь только из идеальных компонент, которая функционирует примерно так же, как и исходная схема. В схеме замещения реального элемента могут быть отражены, при необходимости, различные паразитные эффекты: утечки, внутренние сопротивления и т. д. В зависимости от требуемой точности разработаны и продолжают разрабатываться множество схем замещения одного и того же реального элемента.

1.4 Постановка задачи

Задача определения параметров систем автоматического управления в целом и , в том числе параметров асинхронных двигателей, является актуальной и для ее решения разработано большое количество методов идентификации[2]. Задача определения параметров асинхронных двигателей имеет свои особенности, так как идентифицируются не параметры динамической модели, а параметры схемы замещения.

Параметры схемы замещения могут быть определены расчетными методами на основе паспортных данных асинхронного двигателя (таблица 1).

При исследовании систем управления, содержащих асинхронный двигатель и управляемый преобразователь частоты, появляются дополнительные возможности для экспериментального определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя, так как с помощью преобразователя частоты можно сформировать специальные тестовые сигналы. Например, преобразователи Micromaster 440 позволяют определить параметры схемы замещения , кривую намагничивания (рисунок 11). Параметры двигателя, определенные в процессе идентификации,

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

используются для настройки системы векторного управления асинхронным двигателем.

Поэтому в выпускной квалификационной работе решаются следующие задачи:

- выполнить обзор методов идентификации систем управления;
- выбрать математическую модель асинхронного двигателя;
- провести обзор вариантов схем замещения и выбрать наиболее подходящую;
- освоить метод идентификации параметров асинхронного двигателя;
- определить параметры схемы замещения расчетным способом;
- освоить методику определения параметров схемы замещения, реализованную в приводе Micromaster;
- провести экспериментальные исследования и построить схему замещения для асинхронного двигателя АИР90L6У3;
- проанализировать рассчитанные значения и полученные экспериментально в результате использования частотного преобразователя;
- рассмотреть систему векторного управления асинхронным двигателем.

					<i>БР – 15.03.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

2 Математическое описание асинхронного двигателя

2.1 Математическая модель асинхронного двигателя

Математическая модель асинхронного двигателя [4] представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений (2.4). Эти уравнения трансформируются в зависимости от системы координат, отличающихся угловой скоростью. Основное преимущество использования различных координатных осей – это возможность выделения интересующей исследователя переменной и получения постоянных коэффициентов.

На рисунке 1 показана схема асинхронного двигателя. Где приняты следующие обозначения: U_{su} , U_{sv} - напряжения, подводимые к обмоткам статора, расположенным на ортогональных осях $(u, v, 0)$, вращающихся в пространстве с частотой ω_k ; e_{su} , e_{sv} , e_{ru} , e_{rv} - ЭДС вращения, наводимые в обмотках статора и ротора.

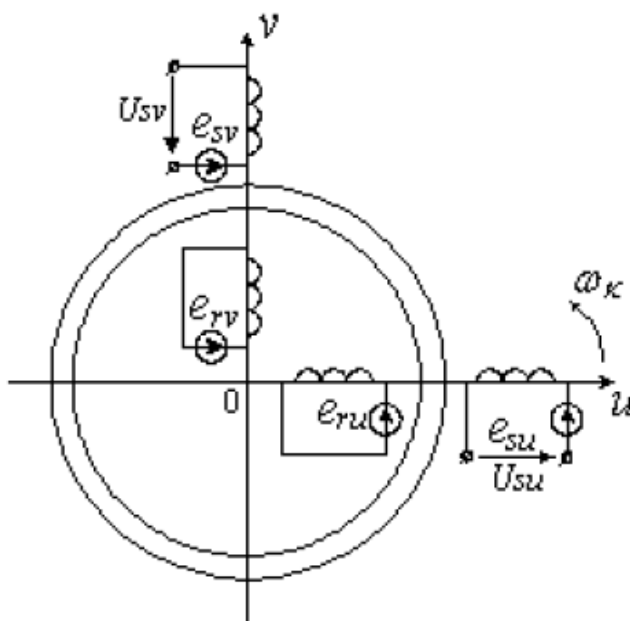


Рисунок 1 – Схема асинхронного двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Уравнения, описывающие переходные процессы в асинхронном двигателе, в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеют вид (2.1):

$$\begin{aligned}\vec{U}_s &= R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s + j\omega_k \vec{\Psi}_s, \\ 0 &= R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_r, \\ M &= \frac{3}{2} p_n J_m (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s), \\ J_\Sigma \frac{d}{dt} \omega &= M - M_c,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где \vec{i}_s , \vec{i}_r , $\vec{\Psi}_s$, $\vec{\Psi}_r$, \vec{U}_s - мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений обмоток статора и ротора;

R_s , R_r - активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора;

ω , ω_k - угловые скорость ротора и координатных осей;

M , M_c - электромагнитный момент двигателя, и момент его сопротивления на валу;

J_Σ - суммарный момент инерции;

p_n - число пар полюсов.

Представив результирующие вектора в виде проекций на комплексной плоскости и можно записать их через вещественные и мнимые части в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\vec{U}_s &= U_{su} + jU_{sv}, \\
\vec{i}_r &= i_{ru} + ji_{rv}, \\
\vec{i}_s &= i_{su} + ji_{sv}, \\
\vec{\Psi}_r &= \Psi_{ru} + \Psi_{rv}, \\
\vec{\Psi}_s &= \Psi_{su} + \Psi_{sv}.
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

Систему уравнений (2.1) в этом случае для координатных осей $(x,y,0)$, где $\omega_k = \omega_s$, можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
U_{sx} &= i_{sx}R_s + \frac{d}{dt}\Psi_{sx} - \omega_c\Psi_{sy}, \\
U_{sy} &= i_{sy}R_s + \frac{d}{dt}\Psi_{sy} - \omega_c\Psi_{sx}, \\
0 &= i_{rx}R_r + \frac{d}{dt}\Psi_{rx} - (\omega_c - \omega)\Psi_{ry}, \\
0 &= i_{ry}R_r + \frac{d}{dt}\Psi_{ry} + (\omega_c - \omega)\Psi_{rx}, \\
M &= \frac{3}{2}p_n(\Psi_{sx}i_{sy} - \Psi_{sy}i_{sx}), \\
J_\Sigma \frac{d}{dt}\omega &= M - M_c.
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

В настоящее время разработано и используется для исследования динамических режимов работы асинхронного двигателя во временной области более 50 различных математических моделей [3]. Наиболее устойчивой и быстродействующей моделью является математическая модель асинхронного двигателя, представленная в осях $(x,y,0)$, где в качестве переменных используют потокосцепления обмоток статора и ротора Ψ_s и Ψ_r .

Выражая токи через потокосцепления, и расписывая систему относительно производных, получают систему уравнений (2.4).

В координатных осях $(x,y,0)$, вращающихся в пространстве с угловой скоростью $\omega_k = \omega_s$, проекции обобщенного вектора напряжения обмотки статора U_{sx}

и U_{sy} представляют собой постоянные величины. В модели обычно совмещают вектор напряжения обмотки статора и вещественной осью координатной системы и относительное значение напряжения по этой оси x принимают равным 1, а по оси y - равным нулю.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \Psi_{sx} &= U_{sx} - \alpha'_s \Psi_{sx} + \alpha'_s K_r \Psi_{rx} + \omega_c \Psi_{sy}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{sy} &= -\alpha'_s \Psi_{sy} + \alpha'_s K_r \Psi_{ry} + \omega_c \Psi_{sx}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{rx} &= -\alpha'_r \Psi_{rx} + \alpha'_r K_s \Psi_{sx} + \omega_c s \Psi_{ry}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{ry} &= -\alpha'_r \Psi_{ry} + \alpha'_r K_s \Psi_{rx} + \omega_c s \Psi_{rx}, \\
 M &= \frac{3}{2} p_n \omega_c \frac{K}{x_c \sigma} (\Psi_{rx} \Psi_{sy} - \Psi_{sx} \Psi_{ry}), \\
 \frac{d}{dt} \omega &= \frac{p_n}{J_\Sigma} (M - M_c).
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Уйдя от координатных осей, получим уравнения (2.5), по которым частотный преобразователь строит математическую модель электродвигателя:

$$\begin{aligned}
 U_s &= I_s R_s + \Psi_s + j \omega_c \Psi_s, \\
 0 &= I_r R_r + \Psi_r + j(\omega_c - p \omega) \Psi_r, \\
 M &= \frac{3}{2} p (\Psi_s I_s), \\
 \omega_r &= \frac{1}{J} (M - M_c), \\
 \Psi_s &= I_s L_s + I_r L_m, \\
 \Psi_r &= I_r L_r + I_s L_m, \\
 L_s &= L_m + L_{s\sigma}, \\
 L_r &= L_m + L_{r\sigma}.
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

где U_s - напряжение статора;

I_s, I_r - токи обмоток статора и ротора;

R_s, R_r - активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора;

Ψ_s, Ψ_r - потокосцепления обмоток статора и ротора;

ω, ω_k - угловые скорости ротора и координатных осей;

L_s, L_r - индуктивности обмоток статора и ротора;

L_m - индуктивность цепи намагничивания;

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ - индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора;

M - электромагнитный момент;

M_c - момент сопротивления на валу;

J - момент инерции ротора;

p - число пар полюсов.

2.2 Определение параметров асинхронного двигателя

При работе асинхронного двигателя его параметры (активные и индуктивные сопротивления статора и ротора) и переменные состояния (потокосцепления, частота вращения ротора, момент вращения и др.) в разной степени изменяются и зависят от режима нагружения и температурного состояния двигателя. По этой причине значения параметров асинхронного двигателя, которые приводятся в каталогах, не могут быть использованы для управления, защиты и диагностики, поскольку являются расчетными. Следовательно, для получения достоверной информации требуется проводить непрерывный во времени мониторинг параметров и переменных величин асинхронного двигателя. При этом основная проблема заключается в том, что во время работы асинхронного двигателя их очень трудно или невозможно измерить, поэтому возникает необходимость в косвенном нахождении значений, например, путем оценивания.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

Динамическая идентификация представляет собой вычислительную процедуру оценивания параметров и переменных состояния асинхронного двигателя в реальном времени (в процессе работы двигателя) на основе использования математической модели двигателя, математических методов оценивания и информации, содержащейся в измеряемых фазных токах и напряжениях статора.

При проведении динамической идентификации хорошие результаты были получены с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) и расширенного фильтра Калмана (РФК). При этом использовались математические модели состояния и цепи измерения асинхронного двигателя, алгоритмы и программное обеспечение для оценивания каждой компоненты вектора параметров и переменных состояния отдельно для статического и динамического режимов работы, поскольку в этих режимах в измеренных значениях напряжений и токов содержится разное количество информации о параметрах и переменных состояния. Определение степени динамичности режима производится с помощью численного критерия, учитывающего мощность первой гармоники потокосцепления статора.

Математические модели состояния и цепи измерения для статических режимов были получены на основе анализа физических процессов в асинхронном двигателе и использования информации, содержащейся в измеряемых фазных напряжениях и токах статора и частоте вращения ротора.

В результате применения РМНК и РФК с использованием полученной совокупности математических моделей состояния и цепи измерения асинхронного двигателя для статического режима работы была проведена динамическая идентификация с получением вектора параметров и состояния в виде:

$$\theta_s = [\Psi_s \Psi_m \Psi_r R_r L_{s\sigma} L_r L_m]^T. \quad (2.6)$$

В отличие от статического режима, динамический режим асинхронного двигателя является более информативным и позволяет одновременно определять

частоту вращения и активное сопротивление ротора. Динамическая идентификация асинхронного двигателя в этом случае основана на использовании РФК и измеренных фазных напряжениях и токах статора. При этом вектор параметров и переменных состояния имеет вид:

$$\theta_d = [\Psi_{r\alpha} \Psi_{r\beta} \omega_r R_s R_r M_c]^T. \quad (2.7)$$

Остальные его компоненты вектора определяются на этапе предварительной идентификации на основе данных, полученных при пуске асинхронного двигателя вхолостую, в режиме холостого хода и при работе асинхронного двигателя в статическом режиме.

Для определения текущего значения активного сопротивления статора разработан отдельный способ, в котором предусмотрено введение постоянных составляющих в фазные напряжения и обработкой данных, полученных измерительной системой, используемой при динамической идентификации асинхронного двигателя [4]. Знание величины активного сопротивления статора позволяет вычислить величину потокосцепления статора [5]. Определение формы кривой намагничивания асинхронного двигателя производится в режиме холостого хода на основе сопоставления во времени тока и потокосцепления статора [6]. Момент инерции ротора определялся известным способом на этапе предварительной идентификации.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Математическое описание физических процессов в асинхронном двигателе в установившихся процессах выполняют на основе эквивалентных схем замещения. Это делают для одной фазы (ввиду симметричности обмоток) при соединении обмоток статора в «звезду». При этом приводят параметры обмотки ротора к параметрам обмотки статора и получают так называемую T – образную схему замещения, которую, как правило, используют при частотном регулировании угловой скорости асинхронного двигателя в области частот ниже номинальной (для отечественных двигателей 50 Гц), а так же для расчета параметров электродвигателя.

3.1 Схема замещения асинхронного двигателя

Уравнениям ЭДС и токов соответствует эквивалентная схема замещения (рисунок 2). Таким образом, сложную магнитную цепь электрической машины можно заменить электрической схемой. Сопротивление $R_2' = \frac{1-s}{s}$ можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку ротора. Оно является единственным переменным параметром схемы. Изменение этого сопротивления эквивалентно изменению нагрузки на валу двигателя и изменению скольжения s .

Величина скольжения задается переменным сопротивлением. В случае отсутствия нагрузки на валу электродвигателя, скольжение почти нулевое $s \approx 0$, значит переменное сопротивление стремится к бесконечности, что эквивалентно режиму холостого хода. И, наоборот, при перегрузке асинхронного двигателя, $s = 1$, поэтому сопротивление равно нулю, что эквивалентно режиму короткого замыкания.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

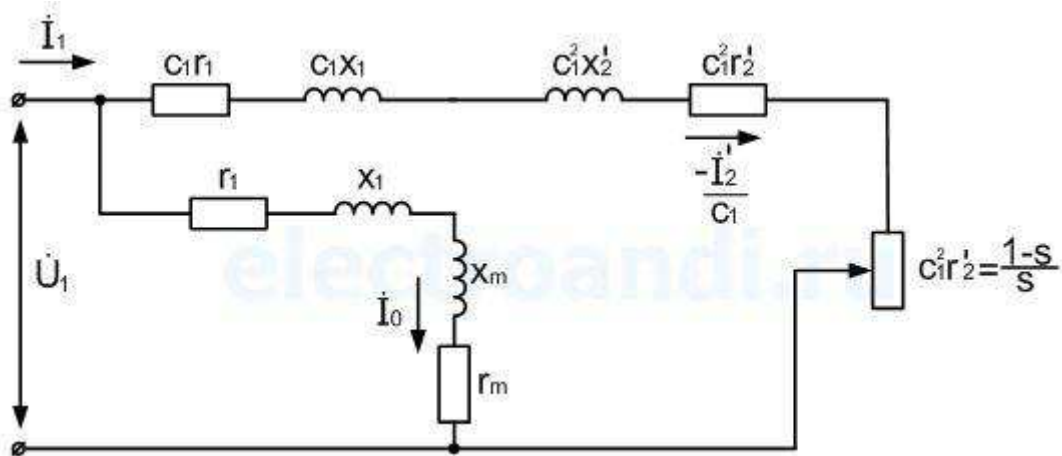


Рисунок 3 – Г-образная схема замещения

3.2 Характеристики двигателя

Определяем параметры для асинхронного электродвигателя АИР90L6У3.

Таблица 1 - Технические характеристики двигателя

Номинальная частота вращения	$f, Гц$	50
Номинальная мощность	$P_{ном}, кВт$	1,5
Номинальная скорость вращения	$n_{ном}, об / мин$	935
Номинальное напряжение	$U_{ном}, В$	380
Номинальный ток	$I_{ном}, А$	4,1
КПД	$\eta, \%$	76
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,72
Скольжение	$s, \%$	6,5
Кратность пускового момента	λ_n	2
Кратность максимального момента	λ_{max}	2,3
Кратность минимального момента	λ_{min}	1,9
Момент инерции	$J, кг \cdot м^2$	0,00513
Масса	$m, кг$	19,4

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

БР – 15.03.06 ПЗ

Лист

25

3.3 Определение параметров схемы замещения традиционным способом

Номинальное фазное напряжение, V :

$$U_{\phi} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}, \quad (3.2)$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение.

Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_{ном}}, \quad (3.3)$$

где f_1 - номинальная частота напряжения статора;

$n_{ном}$ - номинальная скорость вращения ротора.

Скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость вращения),
об / мин:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (3.4)$$

Номинального скольжения:

$$s_{ном} = \frac{n_s - n_{ном}}{n_s}. \quad (3.5)$$

Критическое скольжение:

$$s_{кр} = s_{ном} \cdot (\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1}), \quad (3.6)$$

где λ_{\max} - кратность максимального момента.

Номинальная угловая скорость вращения ротора, *об / мин* :

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30}. \quad (3.7)$$

Номинальный момент, *Н · м* :

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}, \quad (3.8)$$

где $P_{ном}$ - номинальная мощность двигателя.

Номинальный ток фазы статора, *А* :

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi}, \quad (3.9)$$

где $P_{ном}$ - номинальная мощность;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности.

Максимальный момент, *Н · м* :

$$M_{\max} = \lambda_{\max} \cdot M_{ном}, \quad (3.10)$$

где λ_{\max} - кратность максимального момента.

Пусковой момент, *Н · м* :

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

$$M_n = \lambda_n \cdot M_{ном}, \quad (3.11)$$

где λ_n - кратность пускового момента.

Механические потери:

$$P_{мех} = 0,05 \cdot P_{ном}. \quad (3.12)$$

Коэффициент приведения (меньшее значение для большей мощности):

$C = 1,01..1,05$, принимаем $C = 1,05$.

Приведенное активное сопротивление ротора, Ом:

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{ном} + P_{мех}}{I_{ном}^2 \cdot \frac{1 - s_{ном}}{s_{ном}}}. \quad (3.13)$$

Активное сопротивление статора, Ом:

$$R_s = \frac{U_\phi \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_{ном}} - C^2 \cdot R_r - \frac{P_{мех}}{3 \cdot I_{ном}^2} \quad (3.14)$$

где η - КПД;

$I_{ном}$ - номинальный ток.

Приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U_{\phi}}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot k_i \cdot I_{ном}}, \quad (3.15)$$

где k_i - кратность пускового тока.

Индуктивность статора, Γ_n :

$$L_s = \frac{U_{\phi}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_{ном} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{max} \cdot s_n}{p \cdot U_{\phi} \cdot s_{кр}}}. \quad (3.16)$$

Взаимная индуктивность (индуктивность цепи намагничивания), Γ_n :

$$L_m = L_s - L_{sp}. \quad (3.17)$$

3.3.1 Вычисления с помощью MATLAB

Для быстрого и удобного вычисления можно применить MATLAB, используя формулы (3.2-3.17).

```
clc;
```

```
%Исходные данные
```

```
%Номинальное напряжение, В
```

```
Un = 380;
```

```
%Номинальный ток, А
```

```
In = 4.1;
```

```
%Номинальная мощность двигателя, Вт
```

$P_n = 1500;$

%Номинальная частота, Гц

$f = 50;$

%Коэффициент мощности

$\cos\phi = 0.72;$

%Номинальная скорость вращения, об/мин

$n_n = 935;$

%КПД, %

$\eta = 0.76;$

%Кратность максимального момента

$\lambda_{ammax} = 2.3;$

%Кратность пускового момента

$\lambda_{amp} = 2;$

%Кратность минимального момента

$\lambda_{amin} = 1.9;$

%Кратность пускового тока

$k_i = 7;$

%Момент инерции, кг*м²

$J = 0.00513;$

%-----Вычисления-----

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

```
U = Un/sqrt(3);  
U = ceil(U);  
disp ('Фазное напряжение:');  
disp (U);
```

```
pp = (60*f)/nn;  
pp = round(pp);  
disp ('Число пар полюсов:');  
disp (pp);
```

```
n1 = (60*f)/pp;  
disp ('Скорость вращения магнитного поля:');  
disp (n1);
```

```
sn = (n1-nn)/n1;  
disp ('Номинальное скольжение:');  
disp (sn);
```

```
skr = sn*(lyammaх+sqrt((lyammaх^2)-1));  
disp ('Критическо скольжение:');  
disp (skr);
```

```
wn = (3.14*nn)/30;  
disp ('Номинальная угловая скорость вращения вала:');  
disp (wn);
```

```
Mn = Pn/wn;  
disp ('Номинальный момент:');
```

disp (Mn);

$I_n = P_n / (3 * U * \cos \phi_i);$

disp ('Номинальный ток фазы статора:');

disp (In);

$M_{max} = \gamma_{амма} * M_n;$

disp ('Максимальный момент:');

disp (Mmax);

$M_p = \gamma_{амп} * M_n;$

disp ('Пусковой момент:');

disp (Mp);

$Loss_{mech} = 0.025 * P_n;$

disp ('Механический потери:');

disp (Lossmech);

$C = 1.05;$

disp ('Коэффициент приведения:');

disp (C);

$R_r = (1/3) * ((P_n + Loss_{mech}) / ((I_n^2) * ((1 - s_n) / s_n)));$

disp ('Приведенное активное сопротивление ротора:');

disp (Rr);

$R_s = ((U * \cos \phi_i * (1 - \nu) / I_n) - ((C^2) * R_r) - (Loss_{mech} / (3 * (I_n^2))));$

disp ('Активное сопротивление статора:');

disp (Rs);

$$b = (1+(C^2));$$

$$L_{sp} = 2*U/(4*3.14*f*b*ki*In);$$

disp ('Приведенная индуктивность статора:');

disp (Lsp);

$$L_{rp} = L_{sp};$$

disp ('Приведенная индуктивность ротора:');

disp (Lrp);

$$\cos\phi_{sq} = \cos\phi_i^2;$$

$$a = \sqrt{1-\cos\phi_{sq}};$$

$$L_s = U/((2*3.14*f*In*a)-((2/3)*((2*3.14*50*M_{max})/(pp*U))*(sn/skr)));$$

disp ('Индуктивность статора:');

disp (Ls);

$$L_m = L_s - L_{sp};$$

disp ('Взаимная индуктивность:');

disp (Lm);

$$C1 = 1+(L_{sp}/L_m);$$

disp ('Коэффициент приведения:');

disp (C1);

Результат вычислений:

Фазное напряжение: 220 В

Число пар полюсов: 3

Скорость вращения магнитного поля: 1000 об/мин

Номинальное скольжение:	0.065
Критическое скольжение:	0.28413
Номинальная угловая скорость вращения вала:	97.863 об/мин
Номинальный момент:	15.327 Нм
Номинальный ток фазы статора:	3.1566 А
Максимальный момент:	35.253 Нм
Пусковой момент:	30.655 Нм
Механический потери:	37.5 Вт
Коэффициент приведения:	1.05
Приведенное активное сопротивление ротора:	3.5757 Ом
Активное сопротивление статора:	6.8467 Ом
Приведенная индуктивность статора:	0.015081 Гн
Приведенная индуктивность ротора:	0.015081 Гн
Индуктивность статора:	0.32104 Гн
Взаимная индуктивность:	0.30595 Гн
Коэффициент приведения:	1.0493

4 Идентификация параметров электродвигателя

4.1 Настройка базовой конфигурации привода

В данном окне вводятся основные номинальные данные двигателя с таблички.

Drive configuration - MICROMASTER_440 - Motor

Standard
 Motor
 Encoder
 Operating mode
 Command/setpoint sou
 Main parameters
 Completion

1 Motor type: [1] Asynchronous rotational mot

2 Rated voltage: 380 V

3 Rated current: 4.10 A

4 Rated power: 1.50 kW

5 Rated speed: 935 rpm

6 Rated frequency: 50.00 Hz

7 Cos(phi): 0.720

8 Cooling: [0] Self-cooled: Using shaft mo

9 Adapt motor temperature: 20.0 °C

10 87 Hz calculation
 Further motor data

< Back Next > Help

Рисунок 4 – Конфигурация привода – двигатель

1. Тип двигателя – асинхронный вращательный двигатель.
2. Номинальное напряжение – 380 В.
3. Номинальный ток – 4,1 А.
4. Номинальная мощность – 1,5 кВт.

5. Номинальная скорость – 935 об/мин.
6. Номинальная частота – 50 Гц.
7. Косинус (фи) – 0,72.
8. Охлаждение – самоохлаждаемый.
9. Адаптированная температура двигателя – 20°C.
10. Дополнительные данные двигателя.

Если установить флаг «Futher motor data», откроется окно, представленное на рисунке 5.

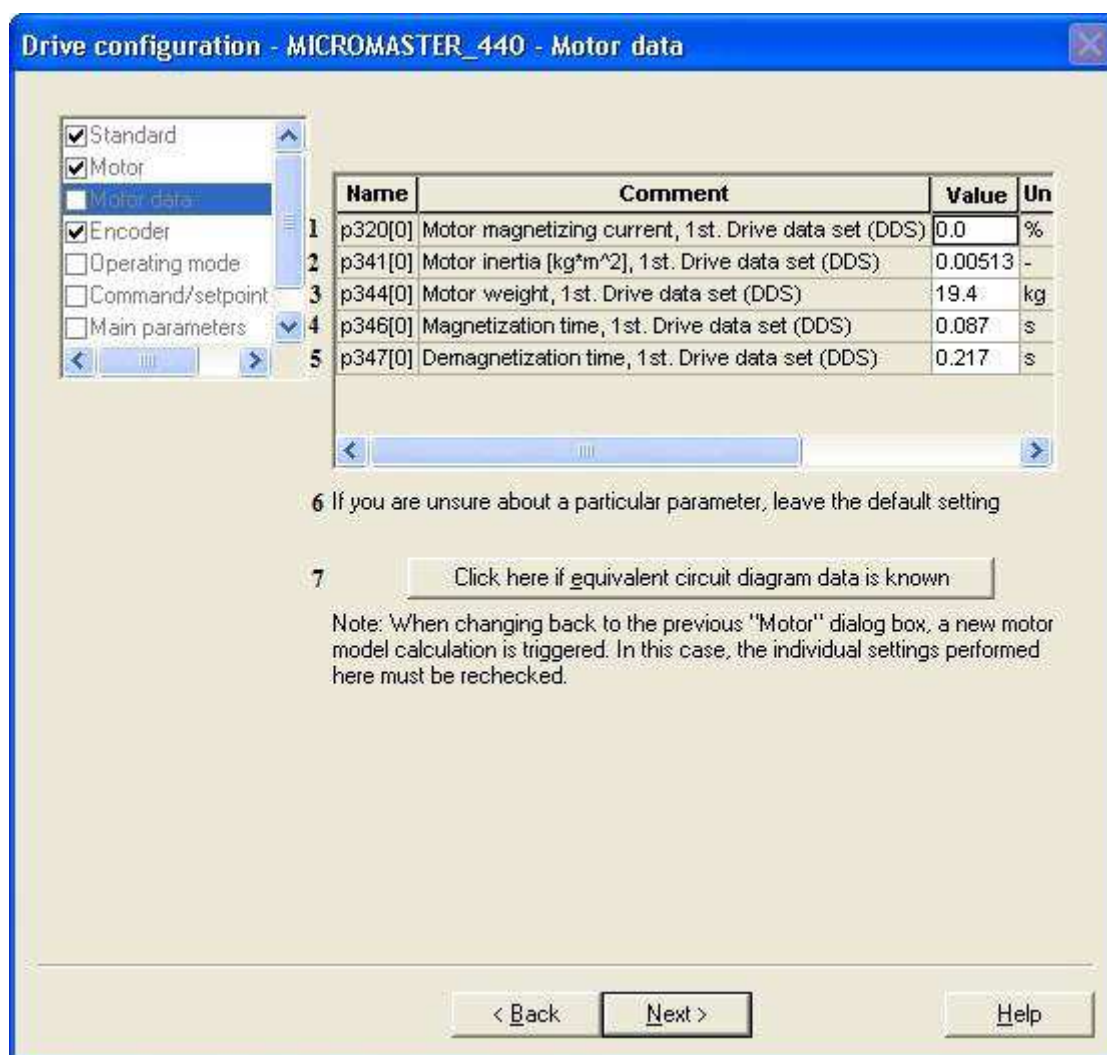


Рисунок 5 – Конфигурация привода – данные двигателя

1. Ток намагничивания – 0%.

2. Момент инерции двигателя – 0,00513 кг*м².
3. Вес двигателя – 19,4 кг.
4. Интервал намагничивания – 0,087 с.
5. Интервал размагничивания – 0,217 с.
6. Если вы не уверены в конкретном параметре, оставьте значение по умолчанию.
7. Щелкните здесь, если известны данные схемы замещения.

Следует выписать значения данных параметров. Кликнув на «7», откроется окно, представленное на рисунок 6.

Name	Comment	Value	Unit
1 p350[0]	Stator resistance (line-to-line), 1st. Drive data set (DDS)	9.49175	Ohm
2 p354[0]	Rotor resistance, 1st. Drive data set (DDS)	2.92188	Ohm
3 p356[0]	Stator leakage inductance, 1st. Drive data set (DDS)	18.12500	-
4 p358[0]	Rotor leakage inductance, 1st. Drive data set (DDS)	19.62500	-
5 p360[0]	Main inductance, 1st. Drive data set (DDS)	237.500	-

Рисунок 6 – Данные схемы замещения

1. Активное сопротивление статора – 9,49175 Ом.
2. Активное сопротивление ротора – 2,92188 Ом.
3. Индуктивное рассеяния статора – 18,125 мГн.
4. Индуктивное рассеяния ротора – 19,625 мГн.
5. Основная индуктивность – 237,5 мГн.

Следует выписать значения данных параметров.

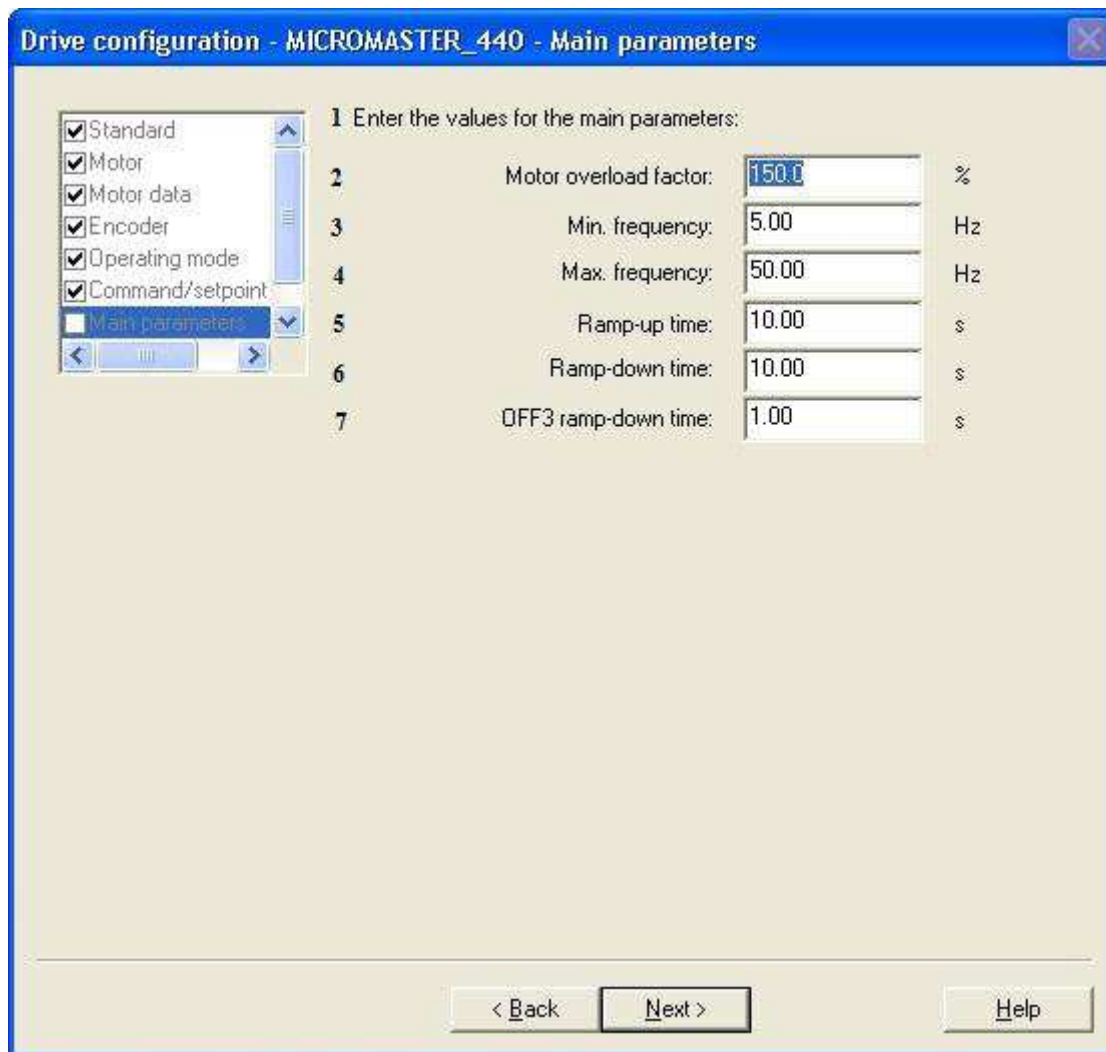


Рисунок 7 – Конфигурация двигателя – главные параметры

1. Введите значения главных параметров:
2. Фактор перегрузки двигателя – 150%.
3. Минимальная частота – 5 Гц.
4. Максимальная частота – 50 Гц.
5. Время разгона – 10с.
6. Время торможения – 10с.
7. OFF3 время торможения – 1с.

Выписав значения главных параметров, переходим к окну завершения (рисунок 8).

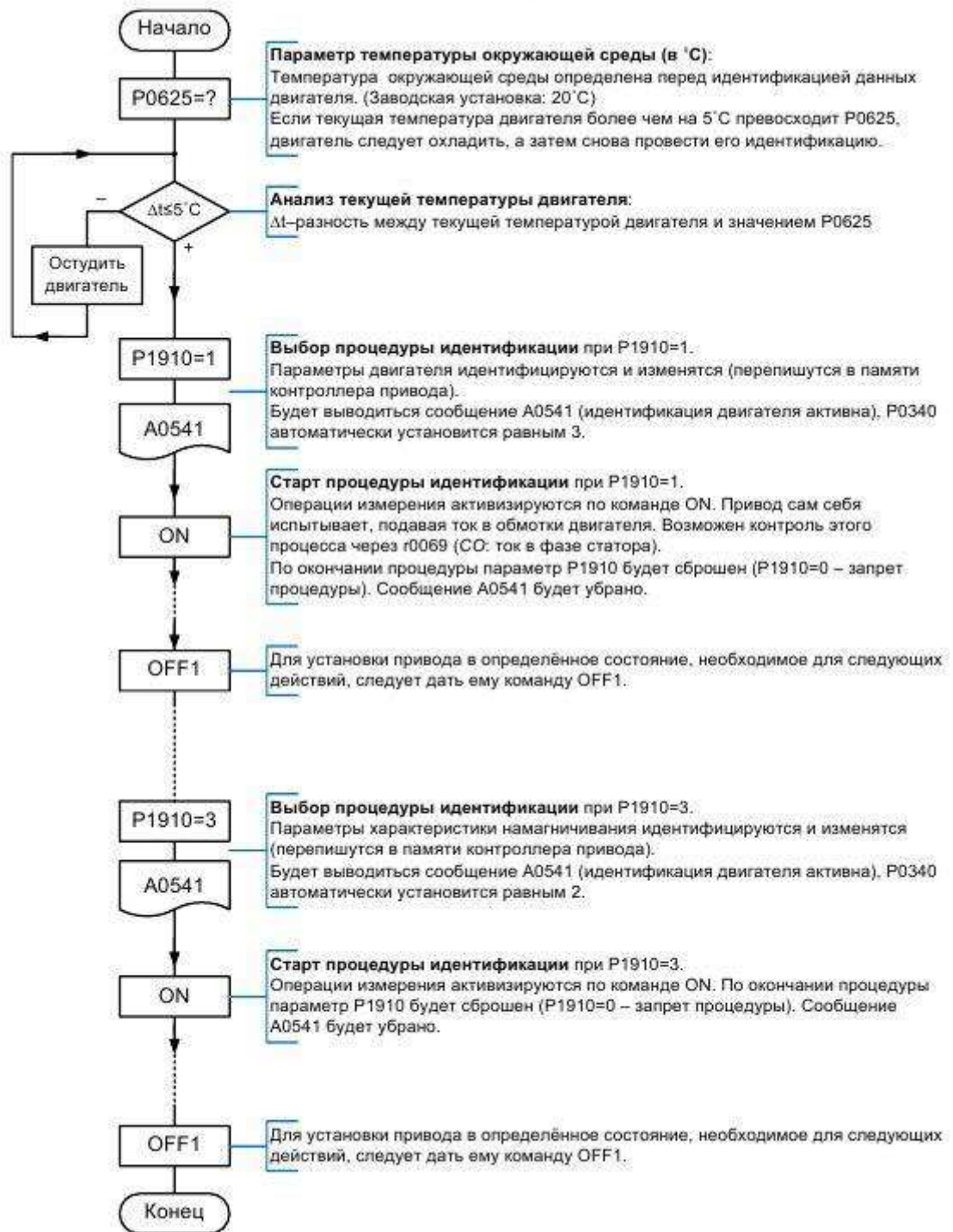


Рисунок 9 – Алгоритм процедуры идентификации двигателя

Впервые запущенная идентификация процедурой P1910=1, на основе номинальных данных с таблички определит данные, показанные на рисунке 10:

- данные эквивалентной схемы замещения привода;
- активное сопротивление;

- напряжение включения транзисторных ключей (IGBT) инвертора и компенсация интервала замыкания IGBT.

Номинальные данные с таблички являются исходными данными для идентификации.

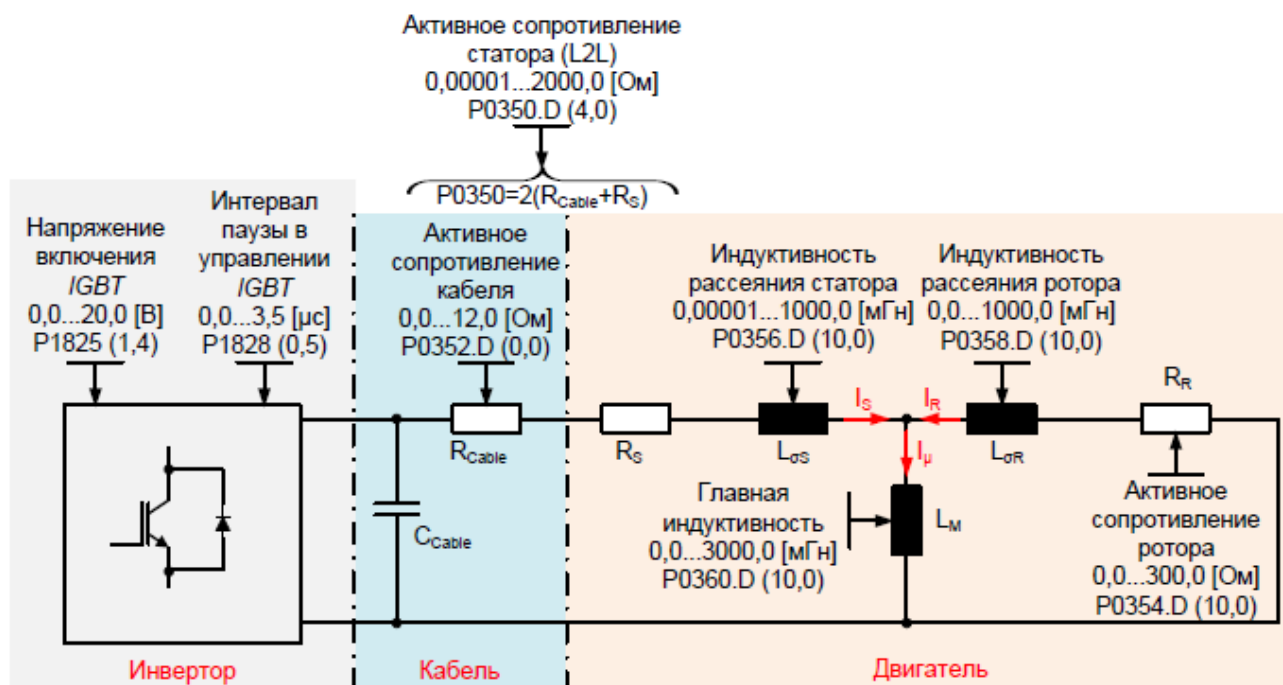


Рисунок 10 – Схема замещения привода и ее параметры

Таблица 2 - Параметры схемы замещения

P0350	значение сопротивления статора при подключенном двигателе. Значение параметра содержит и сопротивление статора	активное сопротивление статора	сопротивление	9,49175 Ом
P0352	указывает сопротивление кабеля между преобразователем и двигателем для одной фазы	активное сопротивление кабеля	сопротивление	0,79098 Ом
P0354	определяет сопротивление ротора схемы замещения двигателя	активное сопротивление ротора	сопротивление	2,92188 Ом

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

Окончание таблицы 2

P0356	определяет индуктивность рассеяния статора схемы замещения двигателя	индуктивность рассеяния статора	418,125 мГн
P0358	определяет индуктивность рассеяния ротора схемы замещения двигателя	индуктивность рассеяния ротора	19,625 мГн
P0360	определяет основную индуктивность схемы замещения двигателя	индуктивное сопротивление	237,5 мГн

Процедура идентификации должна производиться тогда, когда двигатель пребывает в «холодном» состоянии, поскольку величина активного сопротивления должна соответствовать температуре окружающей среды. Только в таком случае при работе привода будет корректно функционировать температурная адаптация, учитывающая изменения активного сопротивления.

Процедура идентификации данных двигателя выполняется на основе данных, полученных в процедуре «Полной параметризации», или на основе данных схемы замещения, которые последними были сохранены. Результат будет существенно лучше, если процедура идентификации повторится большее число раз.

4.3 Сравнение параметров

Для того, чтобы определить насколько верно посчитаны параметры схемы замещения, необходимо произвести сравнение самостоятельно высчитанных параметров и определенных частотным преобразователем (таблица 3).

Таблица 3 - Таблица сравнения параметров

	MATLAB	Micromaster
Сопротивление статора	13,69 Ом*	9,49 Ом
Сопротивление ротора	3,57 Ом	2,92 Ом
Индуктивность статора	321,04 мГн	418,12 мГн
Индуктивность ротора	15,08 мГн	19,62 мГн
Индуктивное сопротивление	305,95 мГн	237,5 мГн

*Частотный преобразователь определяет сопротивление статора между двумя фазами, но по формулам мы можем рассчитать только для одной фазы. Поэтому в столбце MATLAB, сопротивление взято в 2 раза больше, для двух фаз.

В данной таблице можно наблюдать расхождения в значениях. Это обуславливается приблизительно взятыми значениями коэффициента при механических потерях и коэффициента приведения. Так как Micromaster подает сигнал, непосредственно, на сам двигатель, следует принимать его значения более верными, чем расчеты.

4.4 Вычисление данных двигателя и данных системы управления

Операция «Вычисление данных двигателя и управляющих данных» инициируется напрямую через P0340, либо косвенно посредством параметра P3900, либо косвенно с помощью параметра P1910. Возможности параметра P0340 могут быть применены, например, в случае, когда известны данные эквивалентной схемы замещения (рисунок 10) или когда известен момент инерции. Описание возможных установок параметра P0340 приведено в таблице 1. Таблица 4 содержит перечень вычисляемых параметров при различных установках P0340.

Таблица 4- Возможные установки параметра P0340

P0340	Описание
0	Вычисления не выполняются
1	По данным взятым из таблички, вводятся параметры P0300-0335, в результате установки P0340=1 автоматически вычисляются параметры эквивалентной схемы замещения двигателя P0350-0369; параметры веса/момента инерции P0344, P0342; предопределяются параметры системы управления, соответствующие выбранному режиму управления (V/f или векторное управление). При P0340=1 вычисляются все параметры, возможные при других установках.
2	После ввода параметров P0300-0335, взятых из таблички, установкой P0340=2 вычисляются только параметры эквивалентной схемы замещения двигателя P0350-0369.
3	После ввода параметров эквивалентной схемы замещения двигателя P0350-0369 и параметров веса/момента инерции P0344, P0341, P0342, установкой P0340=3, вычисляются параметры системы управления (V/f и векторное управление), включая все, что вычисляется при P0340=4
4	После ввода параметров эквивалентной схемы замещения двигателя P0350-0369 и параметров веса/момента инерции P0344, P0341, P0342, предопределяются параметры системы управления, относящиеся только к режиму векторного управления.

Параметры схемы замещения (рисунок 10) были определены косвенно параметром P1910, поэтому параметром P0340=1, можно определить все возможные данные электродвигателя (таблицы 5-15), а так же понять влияет ли выбранный параметр идентификации на значения.

Таблица 5 - Параметры двигателя

P0341	Момент инерции, кг*м ²	Указывает момент инерции масс двигателя	0,00513
P0342	Соотношение инерций: общая/двигатель	Показывает отношение между общей инерцией (нагрузка + двигатель) и инерцией двигателя	1
P0344	Вес двигателя, кг	Показывает вес двигателя	19,4
P0345	Пусковой период двигателя, с	Показывает пусковой период двигателя. То время соответствует стандартизированному моменту инерции масс двигателя.	0,035

Окончание таблицы 5

P0346	Время намагничивания, с	Определяет время намагничивания, т.е. время ожидания между разрешением импульсов и началом разгона. В течение этого времени нарастает намагничивание двигателя.	0,074
P0347	Время размагничивания, с	Определяет время размагничивания подключенного асинхронного двигателя.	0,184
P0350	Сопротивление статора, Ом	Значение сопротивления статора при подключенном двигателе (межфазное). Значение параметра содержит и сопротивление кабеля.	9,49175
P0352	Сопротивление кабеля, Ом	Указывает сопротивление кабеля между преобразователем и двигателем для одной фазы	0,79098
P0354	Сопротивление ротора, Ом	Определяет сопротивление ротора схемы замещения двигателя (значение фазы).	2,92188
P0356	Индуктивность рассеяния статора, мГн	Определяет индуктивность рассеяния статора схемы замещения.	418,125
P0358	Индуктивность рассеяния ротора, мГн	Определяет индуктивность рассеяния ротора схемы замещения двигателя.	19,625
P0360	Основная индуктивность, мГн	Определяет основную индуктивность схемы замещения двигателя.	237,5

При прямом (таблица 5) и косвенном (таблица 2) определении параметров схемы замещения, значения идентичны. Таким образом, для определения параметров, можно использовать любой способ.

Таблица 6 - Температура двигателя

P0625	Внешняя температура на двигателе, °С	Температура окружающей среды двигателя. При этом сопротивление статора или сопротивление ротора относятся к внешней температуре на двигателе.	20
-------	--------------------------------------	---	----

Таблица 7 - Регулятор Vdc

P1253	Ограничение выходы регулятора Vdc, Гц	Ограничивает выход регулятора Vdc-max	8,13
-------	---------------------------------------	---------------------------------------	------

Регулятор Vdc – регулятор напряжения промежуточного контура.

Таблица 8 - Метод управления U/f

P1316	Конечная частота повышения напряжения, %	Указывает частоту, при которой повышение составляет 50% его спараметрированного значения напряжения.	27,5
-------	--	--	------

Таблица 9 - Регулятор скорости

P1460	Коэффициент усиления регулятора скорости	Указывает усиление регулятора скорости.	1,9
P1462	Время интегрирования регулятора скорости, мс	Указывает постоянную времени интегрирования регулирования скорости.	144

Таблица 10 - Дополнительное заданное значение момента вращения

P1520	Верхнее предельное значение момента вращения, Нм	Указывает верхнее ограничение момента вращения.	22,98
-------	--	---	-------

Таблица 11 - Ограничение момента вращения/мощности

P1521	Нижнее предельное значение момента вращения, Нм	Указывает нижнее ограничение момента вращения.	22,98
P1530	Предельное значение моторной мощности	Указывает максимальную допустимую мощность в моторном режиме. Ограничивает момент вращения в зависимости от фактической частоты.	3,75

Окончание таблицы 11

P1531	Предельное значение генераторной мощности	Указывает максимально допустимую мощность в генераторном режиме.	3,75
-------	---	--	------

Таблица 12 - Модель двигателя

P1764	Кр n-адаптации (SLVC)	Вводит усиление адаптивного регулятора скорости для векторного управления без датчика (SLVC)	0,387
-------	-----------------------	--	-------

Таблица 13 - Контрольные параметры

P2000	Опорная частота, Гц	Определяет опорную частоту для значений частоты, которые отображаются/передаются в процентах.	50
P2002	Опорный ток, А	Опорный ток (выходной ток)	8,2

Таблица 14 - Ошибки, предупреждения, контроли

P2174	Время задержки Vdc, мс	Определяет время задержки перед активацией сравнения порогового значения.	15,32
-------	------------------------	---	-------

Таблица 15 - Контроль момента нагрузки

P2185	Верхний порог момента нагрузки M_o1, Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_o1, которое сравнивается с моментом нагрузки.	15,32
P2186	Нижний порог момента нагрузки M_u1, Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_u1, которое сравнивается с моментом нагрузки.	0
P2187	Верхний порог момента нагрузки M_o2, Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_o1, которое сравнивается с моментом нагрузки.	15,32
P2188	Нижний порог момента нагрузки M_u2, Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_u2, которое сравнивается с моментом нагрузки.	0

Окончание таблицы 15

P2189	Верхний порог момента нагрузки M_{o3} , Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_{o3} , которое сравнивается с моментом нагрузки.	15,32
P2190	Нижний порог момента нагрузки M_{u3} , Нм	Указывает пороговое значение момента вращения M_{u3} , которое сравнивается с моментом нагрузки.	0

5 Система управления электроприводом с учетом идентифицируемых параметров

5.1 Векторное управление

Векторное управление - метод управления электродвигателями переменного тока, который позволяет независимо и практически безынерционно регулировать скорость вращения и момент на валу электродвигателя.

Главная идея векторного управления заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и фазу. Другими словами контролируется величина и угол пространственного вектора. Векторное управление обладает более высокой производительностью. Векторное управление избавляет практически от всех недостатков скалярного управления.

Преимущества векторного управления:

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

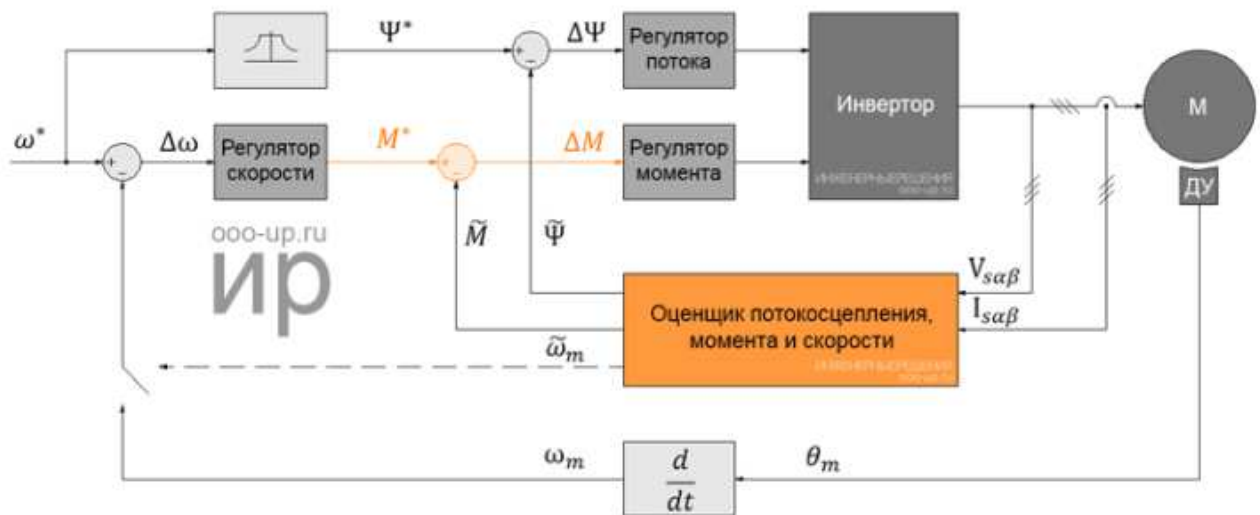


Рисунок 11 – Функциональная схема векторного управления

Основой схемы являются контуры контроля магнитного потокосцепления и момента вместе с блоком оценки, который может быть реализован различными способами. При этом внешний контур управления скоростью в значительной степени унифицирован и генерирует управляющие сигналы для регуляторов момента M^* и магнитного потокосцепления Ψ^* (через блок управления потоком). Скорость двигателя может быть измерена датчиком (скорости / положения) или получена посредством оценщика, позволяющего реализовать бездатчиковое управление.

5.2 Классификация методов векторного управления

Методы контроля момента представлены для систем управления асинхронными двигателями и синхронными двигателями с постоянными магнитами с синусоидальной обратной ЭДС.

Существующие методы управления моментом могут быть классифицированы различным способом.

Чаще всего методы управления моментом разделяют на следующие группы:

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

5.2.1. Линейные регуляторы момента

Линейные регуляторы момента работают вместе с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения. Регуляторы определяют требуемый вектор напряжения статора. Вектор напряжения окончательно синтезируется методом ШИМ, в большинстве случаев используется пространственно-векторная модуляция (ПВМ). В отличие от нелинейных схем управления моментом, где сигналы обрабатываются по мгновенным значениям, в линейных схемах контроля момента, линейный регулятор (ПИ) работает со значениями усредненными за период дискретизации.

К группе линейных регуляторов относят следующие методы управления моментом:

- полеориентированное управление;
- прямое управление моментом с пространственно векторной модуляцией напряжения;
- прямое управление моментом с пространственно-векторной модуляцией потока.

5.2.1.1 Полеориентированное управление

Полеориентированное управление - метод регулирования, который управляет электродвигателем переменного тока, как машиной постоянного тока с независимым возбуждением, подразумевая, что поле и момент могут контролироваться отдельно.

Полеориентированное управление основано на аналогии с механически коммутируемым коллекторным двигателем постоянного тока с независимым

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		51

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

5.2.1.2 Прямое управление вектором с пространственно-векторной модуляцией напряжения

Блок-схема прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией с регулировкой момента и потокосцепления с обратной связью работающей в прямоугольной системе координат ориентированной по полю статора представлена на рисунке 13. Выходы ПИ регуляторов момента и потокосцепления интерпретируются как опорные составляющие напряжения статора V_{ψ}^* и V_M^* в системе координат dq ориентированной по полю статора. Эти команды (постоянные напряжения) затем преобразуются в неподвижную систему координат $\alpha\beta$, после чего управляющие значения $V_{s\alpha}^*$ и $V_{s\beta}^*$ поступают на модуль пространственно-векторной модуляции.

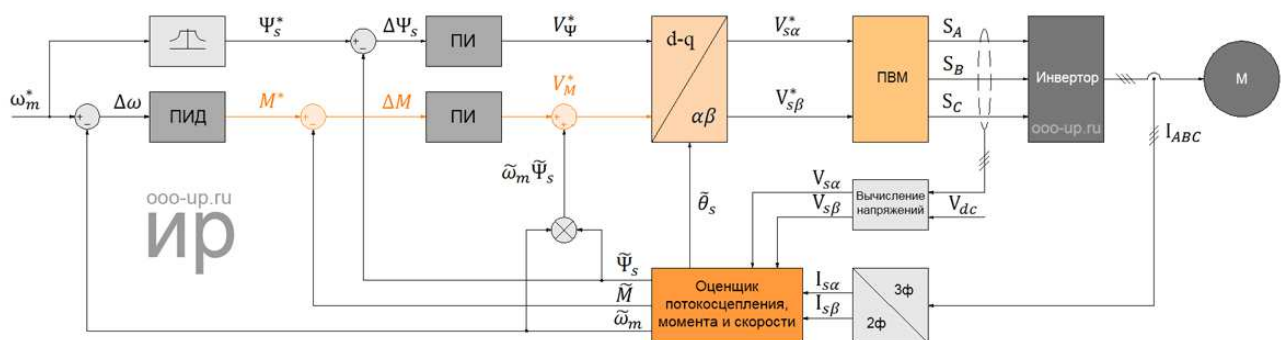


Рисунок 13 – Функциональная схема прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией напряжения

Данная схема может рассматриваться как упрощенное управление ориентированное по полю статора без контура управления током или как классическая схема прямого управления моментом с таблицей включения в которой таблица включения заменена модулятором пространственно-векторной модуляции, а гистерезисный регулятор момента и потока заменены линейными ПИ регуляторами.

В схеме прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией момент и потокосцепление напрямую управляются в замкнутом контуре, поэтому необходима точная оценка потока и момента двигателя. Прямое управление моментом с пространственно-векторной модуляцией работает на постоянной частоте переключения. Это значительно повышает характеристики системы управления: уменьшает пульсации момента и потока, позволяет уверенно запускать двигатель и работать на низких оборотах. Но при этом снижаются динамические характеристики привода.

5.2.2 Нелинейные регуляторы момента

Представленная группа регуляторов момента отходит от идеи преобразования координат и управления по аналогии с коллекторным двигателем постоянного тока, являющегося основой для полеориентированного управления. Нелинейные регуляторы предлагают заменить отдельное управление на непрерывное (гистерезисное) управление, которое соответствует идеологии работы (включено-выключено) полупроводниковых устройств инвертора.

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

Преимущества:

- простая схема управления;
- отсутствуют контуры тока и прямое регулирование тока;
- не требуется преобразование координат;

- отсутствует отдельная модуляция напряжения;
- датчик положения не требуется;
- хорошая динамика

Недостатки:

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

К группе нелинейных регуляторов момента относят:

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

5.2.2.1 Прямое управление моментом

Схема классического метода прямого управления моментом на много проще, чем у метода управления по полю, так как не требуется преобразования систем координат и измерения положения ротора. Схема метода прямого управления моментом (рисунок 14) содержит оценщик момента и потокосцепления статора, гистерезисные компараторы момента и потокосцепления, таблицу включения и инвертор.

Принцип метода прямого управления моментом заключается в выборе вектора напряжения для одновременного управления и моментом и потокосцеплением статора. Измеренные токи статора и напряжение инвертора используются для оценки потокосцепления и момента. Оцененные значения потокосцепления статора

$\tilde{\Psi}_s$ и момента \tilde{M} сравниваются с управляющими сигналами потокосцепления статора Ψ_s^* и момента двигателя M^* соответственно посредством гистерезисного компаратора. Требуемый вектор напряжения управления электродвигателем выбирается из таблицы включения исходя из оцифрованных ошибок потокосцепления d_Ψ и момента d_M генерируемых гистерезисными компараторами, а также исходя из сектора положения вектора потокосцепления статора. Таким образом, импульсы S_A , S_B и S_C для управления силовыми ключами инвертора генерируются посредством выбора вектора из таблицы.

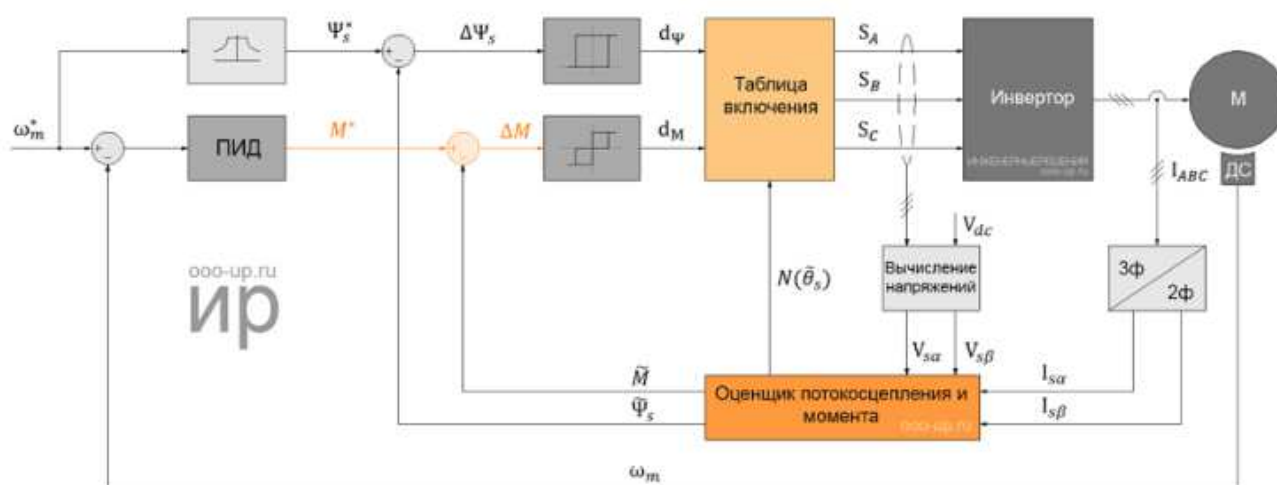


Рисунок 14 – Классическая схема прямого управления моментом с таблицей включения с датчиком скорости

Имеется множество вариаций классической схемы прямого управления моментом нацеленных на улучшение пуска, условий перегрузки, работы на очень низких скоростях, уменьшение пульсаций момента, работу на переменной частоте переключения и уменьшение уровня шумов.

Недостатком классического метода прямого управления моментом является наличие высоких пульсаций тока и момента в установившемся состоянии.

- несинусоидальные формы потокосцепления и тока статора;
- вектор потокосцепления статора перемещается по шестиугольной траектории;
- нет запаса по напряжению питания, возможности инвертора используются полностью;
- частота переключения инвертора ниже чем у прямого управления моментом с таблицей включения;
- отличная динамика в диапазонах постоянного и ослабленного поля.

5.3 Структурные схемы замкнутых асинхронных машин с векторным управлением

5.3.1 Частотная асинхронная система с векторным управлением

Математическое описание и структурная схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) при его питании от источника напряжения для случая, когда базовым вектором является вектор потокосцепления ротора, приведено ниже (5.1-5.2).

$$\begin{aligned}
 u_{Sx} &= r(1 + T_S' s) i_{Sx} - \omega_K L_S' i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}, \\
 u_{Sy} &= r(1 + T_S' s) i_{Sy} + \omega_K L_S' i_{Sx} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 M &= 1.5 p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Существенной особенностью этой математической модели является то обстоятельство, что угловая скорость вращения системы координат зависит от значений переменных состояния машины и определяется из четвертого уравнения системы (5.2).

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{sy}}{\psi_{Rx}} + p \omega_m. \quad (5.2)$$

В этом случае, как это видно из структурной схемы (рисунок 16), АКЗ, как объект управления, имеет два взаимосвязанных канала. Канал по составляющей x , определяющий потокосцепление ротора и канал по составляющей y , определяющий составляющую тока i_{sy} . Если организовать управление так, чтобы на выходе канала x поддерживать постоянный сигнал, то потокосцепление ротора будет постоянным, а сигнал в канале y , будет определять момент. В этом случае структурная схема АКЗ повторяет структурную схему двигателя постоянного тока (ДПТ). Для такой реализации необходимо в канале x синтезировать регулятор потокосцепления, на входе которого поддерживать постоянный сигнал, а в канале y синтезировать регуляторы тока и скорости. Структурная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением показана на рисунке 17.

В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило, $T_R \gg T'_s$, поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать ПИ – регулятор с передаточной функцией $W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}$, тогда для реализации в этом канале оптимума по модулю коэффициент усиления регулятора рассчитывается из условия (5.3):

$$k_{p\psi} = \frac{r}{2T'_s k_R R_R k_{oc.\psi}}. \quad (5.3)$$

Рассчитанный таким образом ПИ – регулятор компенсирует перекрестные связи в канале x .

Для компенсации влияния перекрестных связей в канале y следует также выбрать ПИ - регулятор с передаточной функцией:

$$W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_s s + 1)}{T'_s s} \quad (5.4)$$

Тогда передаточная функция замкнутого токового контура в канале y будет равна:

$$W_i(s) = \frac{1}{k_{oc.i}} \frac{1}{\frac{T'_s r}{k_{pi} k_{oc.i}} s + 1} \approx \frac{1}{k_{oc.i}}, \text{ при } k_{pi} \gg 1 \quad (5.5)$$

При компенсированных перекрестных связях канал y , отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока. Для придания этой системе

астатизма по скорости необходимо выбрать ПИ - регулятор скорости с передаточной функцией:

$$W_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega}s + 1)}{T_{p\omega}s} \quad (5.6)$$

Тогда передаточная функция системы по возмущению будет равна:

$$W'(s) = \frac{-k_{oc.i}}{1.5pk_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega}s}{\frac{T_{p\omega} J k_{oc.i}}{k_{oc.\omega} k_{p\omega}} s^2 + T_{p\omega}s + 1} \approx \frac{-k_{oc.i}}{1.5pk_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega}s}{T_{p\omega}s + 1}, \text{ при } k_{p\omega} \gg 1 \quad (5.7)$$

Провал скорости при приложении момента определится из выражения:

$$\Delta\omega_m = \frac{-k_{oc.i}}{1.5pk_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \Delta M_H. \quad (5.8)$$

Это может быть определяющим в выборе коэффициента усиления регулятора скорости.

Модель асинхронной системы вместе с регуляторами скорости и потока, рассчитанными в соответствии с вышеизложенным представлена на рисунке 18.

Здесь же для сравнения помещена модель эквивалентной системы постоянного тока.

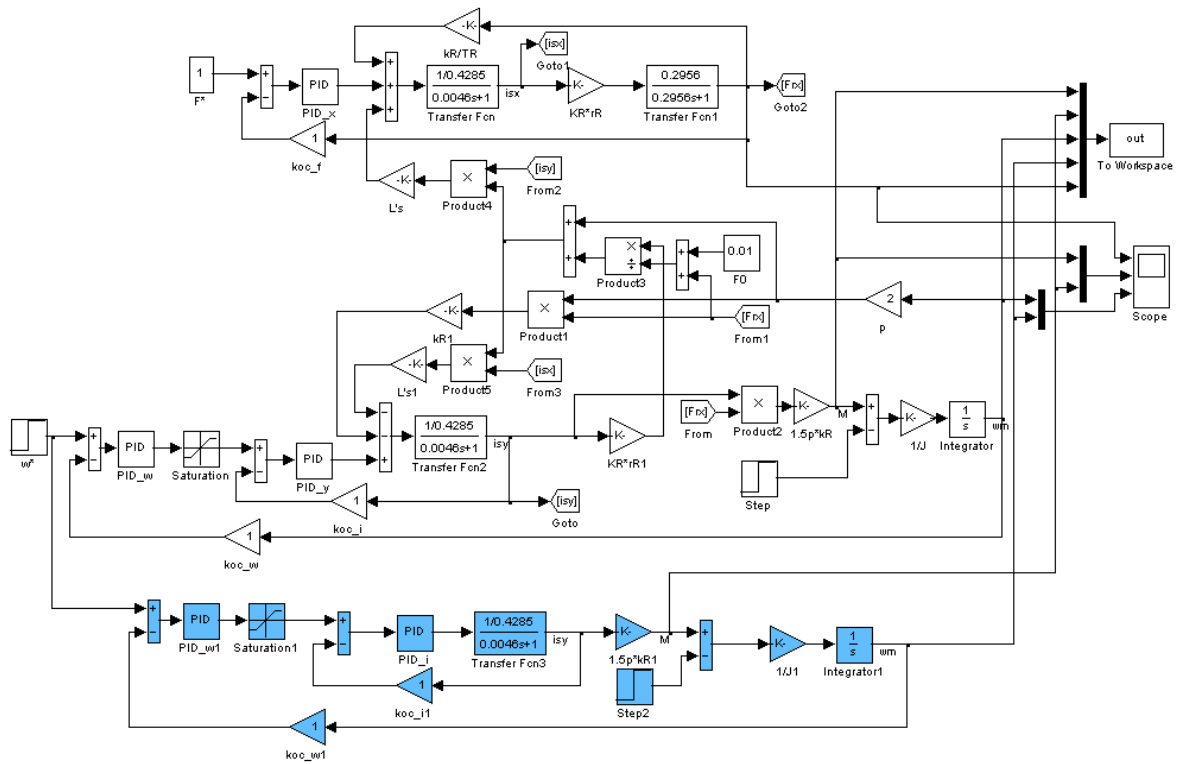


Рисунок 18 – Модели асинхронной векторной системы и эквивалентной СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

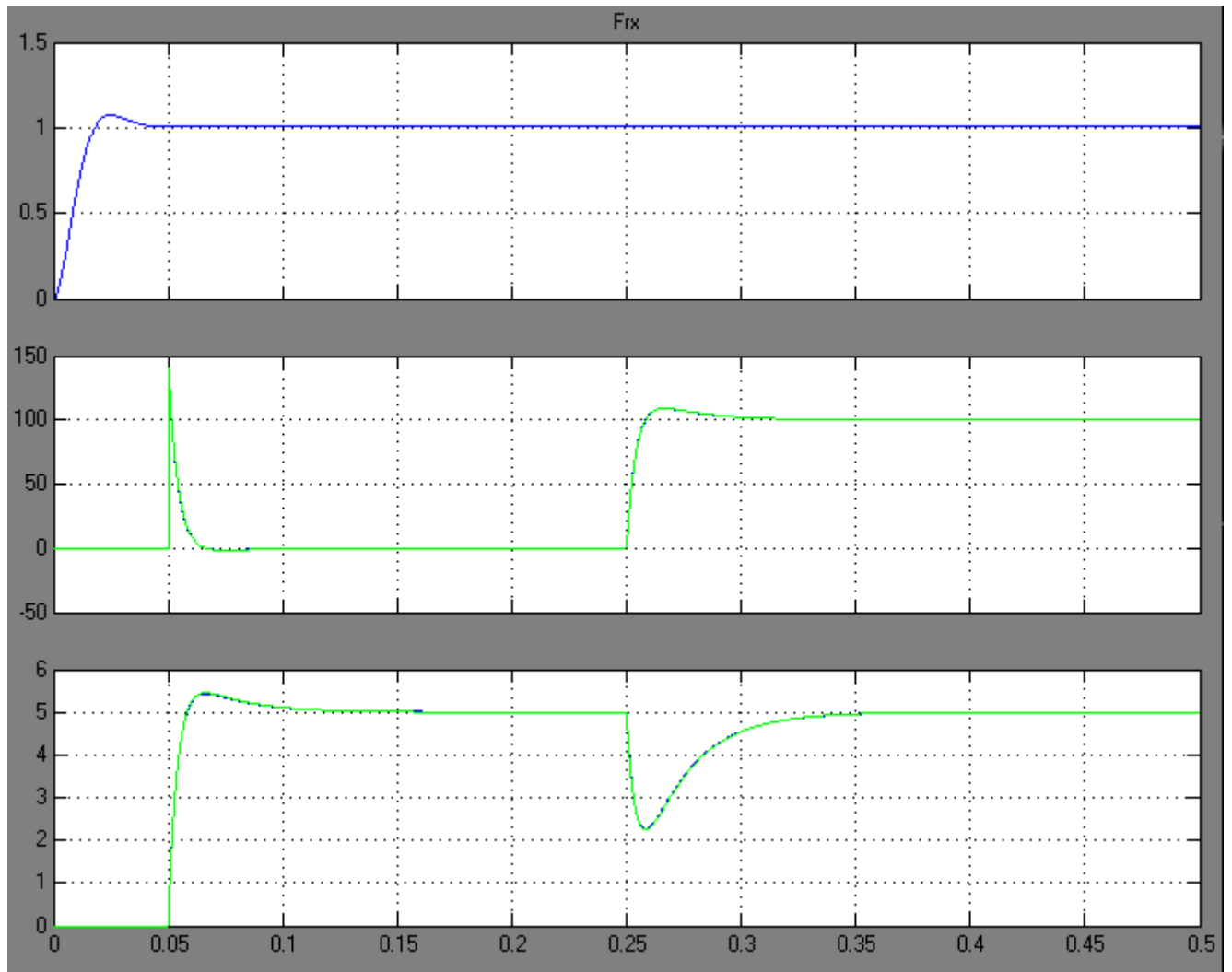


Рисунок 19 – Переходные процессы в замкнутой системе с векторным управлением

На рисунке 19 представлены переходные процессы потока, момента, скорости.

Переходные процессы в системе приведены на рисунке 19. Сравнение результатов асинхронной системы с векторным управлением и эквивалентной системы постоянного тока показывает их полную идентичность при малых и больших сигналах управления.

Коэффициенты передач регуляторов выбираем так, чтобы постоянная времени в канале управления потоком была на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью. Модель электропривода вместе с регуляторами скорости и потока, а также с ограничениями, представлена на рисунке 20.

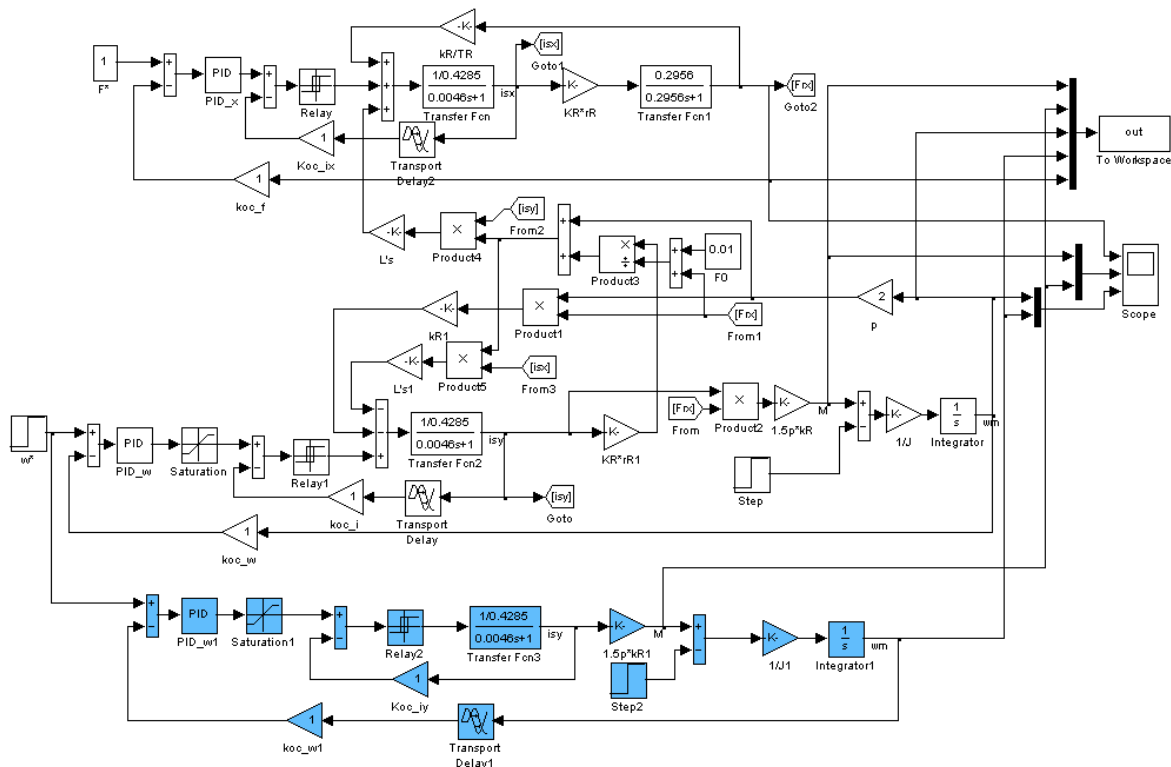


Рисунок 21 – Модели асинхронной системы с частотно-токовым векторным управлением и эквивалентной системой постоянного тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

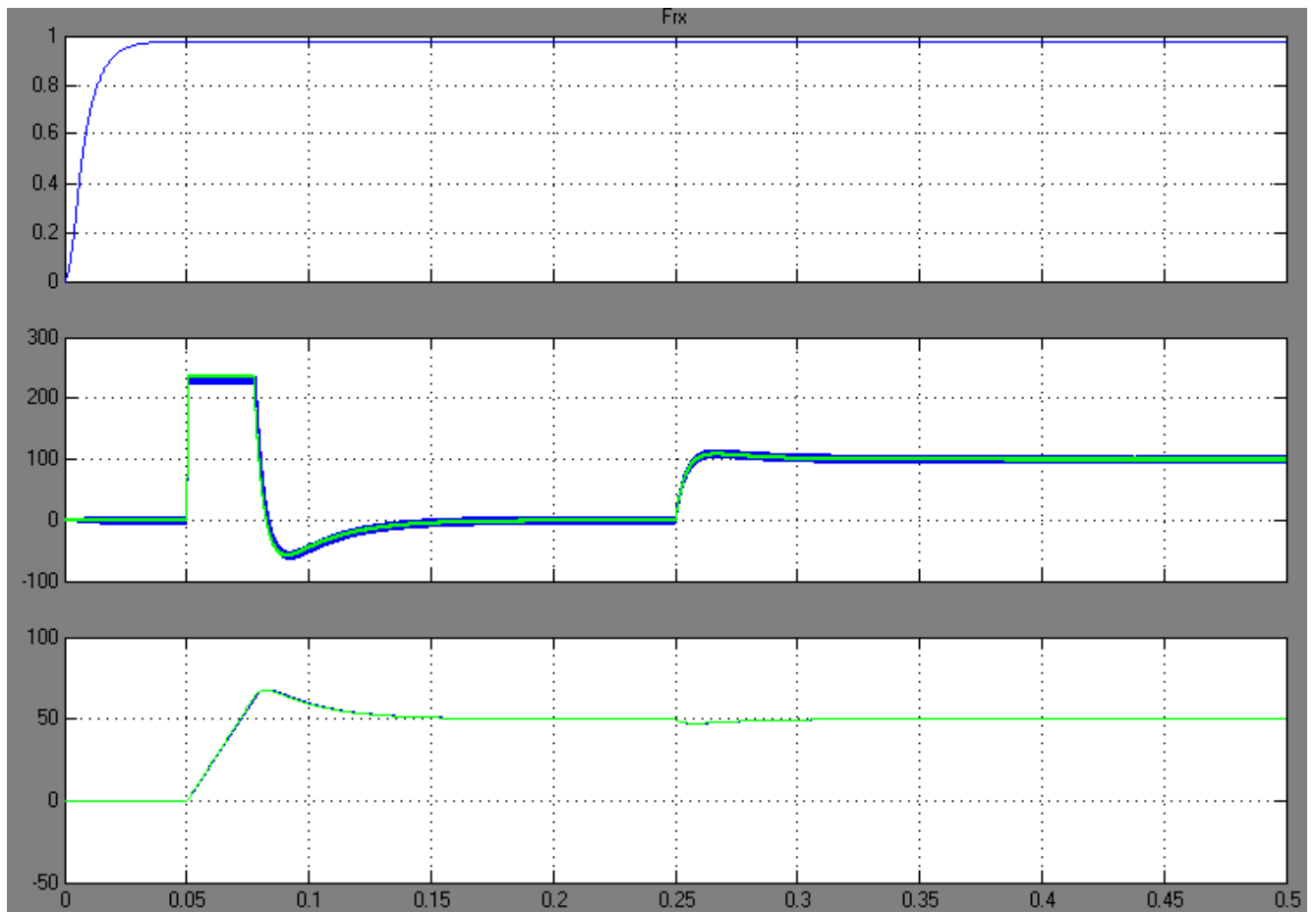


Рисунок 22 – Переходные процессы в замкнутой асинхронной частотно-токовой системе с векторным усилением

На рисунке 22 представлены переходные процессы потока, момента, скорости.

Достаточно простая структура замкнутого асинхронного электропривода получается вследствие того, что изначально в математическое описание заложены все необходимые преобразования, а именно:

- преобразование системы координат;
- ориентация системы координат по оси потокосцепления ротора;
- идеальность источника тока, питающего машину.

Математическое описание, структуры схемы и модели, рассмотренные выше, соответствует описанию по «гладкой» составляющей и не учитывает импульсного характера напряжения на выходе инвертора.

6 Экономическая часть

6.1 Расчет комплексного показателя технического уровня

Оценка технического уровня изделия начинается с отбора базовой модели.

Для оценки изделия, находящегося в стадии исследования или разработки, БМ (базовая модель) формируется с учетом тенденций и прогнозов развития направлений техники, требований технического задания в целях обеспечения опережения или соответствия оцениваемого изделия высокому уровню.

На стадии изготовления изделия за базовую принимается аналогичная по функциональному назначению лучшая из отечественных или зарубежных видов продукция.

В случае отсутствия аналогов или отдельных показателей, входящих в номенклатуру сопоставляемых показателей качества, их значения определяются ТЗ и результатами проводимых исследований.

КПТУ базовой модели принимается равным 1.

При расчете КПТУ важно определить коэффициенты весомости b_i , отражающие значимость, степень влияния i -го параметра на величину полезного эффекта. Наиболее распространен метод определения b_i на основе экспертных оценок.

Оценка технического уровня изделия начинается с отбора базовой модели.

Параметры двигателя оцениваются следующим образом:

x_1 – масса двигателя;

x_2 – номинальная скорость двигателя;

x_3 – КПД;

x_4 – цена.

Сравнив попарно все параметры, подлежащие анализу, строят квадратную матрицу смежности; где знаки „>”, „=” и „<” заменяют коэффициентами предпочтительности a_i (соответственно: 1,5; 1,0; 0,5).

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

Последовательно находят абсолютные значимости B_i параметров, затем нормированием – относительные b_i (вычисляются в долях единицы). При расчете B_i каждая строка в матрице умножается на вектор-столбец $\sum a_i$

Результаты расчета относительных показателей качества q_i проектируемого изделия и коэффициентов весомостей b_i сводят в таблицу 16.

Если новое изделия более совершенно по сравнению с базовой, рассчитанный подобным образом КПТУ его будет больше единицы. Если величина КПТУ меньше единицы, необходим анализ технических показателей ТЗ.

Таблица 16 – Матрица смежности параметров

	$x1$	$x2$	$x3$	$x4$	a_i	b_i	B_i
$x1$	1	0,5	0,5	1	3	0,1875	11
$x2$	1,5	1	1	1,5	5	0,3125	19
$x3$	1,5	1	1	1,5	5	0,3125	19
$x4$	1	0,5	0,5	1	3	0,1875	11
Σ					16	1	60

Находим относительные значения b_i по формуле (6.1):

$$b_i = a_i / \sum a_i ; \quad (6.1)$$

$$b_1 = 3 / 16 = 0,1875 ;$$

$$b_2 = 5 / 16 = 0,3125 ;$$

$$b_3 = 5 / 16 = 0,3125 ;$$

$$b_4 = 3 / 16 = 0,1875 .$$

После сравнения каждого параметра базового и проектируемого варианта, находим абсолютные значения B_i по формуле (6.2). При расчете, каждая строка в матрицы умножается на вектор-столбец:

$$B_i = x_1 \times \sum a_{i1} + x_2 \times \sum a_{i2} + x_3 \times \sum a_{i3} + x_4 \times \sum a_{i4}; \quad (6.2)$$

$$B_1 = 1 \cdot 3 + 0,5 \cdot 5 + 0,5 \cdot 5 + 1 \cdot 3 = 11;$$

$$B_2 = 1,5 \cdot 3 + 1 \cdot 5 + 1 \cdot 5 + 1,5 \cdot 3 = 19;$$

$$B_3 = 1,5 \cdot 3 + 1 \cdot 5 + 1 \cdot 5 + 1,5 \cdot 3 = 19;$$

$$B_4 = 1 \cdot 3 + 0,5 \cdot 5 + 0,5 \cdot 5 + 1 \cdot 3 = 11.$$

Данных расчетов КПТУ, проектируемой модели, представлены в таблице 2.

Относительные показатели рассчитываются по формуле (6.3):

$$q_i = \frac{P\bar{b}_i}{P_{n_i}} = \frac{P_{n_i}}{P\bar{b}_i}, \quad (6.3)$$

где $P\bar{b}_i$, P_{n_i} - абсолютные значения i -го показателя качества, базовой и новой модели соответственно.

Таблица 17 – Номенклатура показателей технико-экономического анализа

Номенклатура основных параметров	Единицы измерения	Значение параметров		q_i	b_i	$b_i \cdot q_i$
		базовой	новой			
Масса	кг	19,4	12,9	1,217	0,1875	0,2281
Номинальная скорость двигателя	об/мин	935	2860	3,1256	0,3125	0,9767
КПД	%	76	77,2	1,0589	0,3125	0,3309
Стоимость	руб.	12691	10405	1,2197	0,1875	0,2285
КПТУ						1,7642

Так как КПТУ выше единицы, то наша разработка соответствует высокому уровню.

6.2 Расчет затрат на производство и эксплуатацию

Приведенные затраты Z_{np} на производство и эксплуатацию рассчитываются по формуле (6.4):

$$Z_{np} = I + E_n \times K, \quad (6.4)$$

где I – эксплуатационные издержки и затраты на эксплуатацию, руб/год;

E_n – коэффициент, учитывающий срок службы,

$$E_n = \frac{1}{год}. \quad (6.5)$$

Срок службы двигателя принимаем 15 лет, тогда

$$E_n = \frac{1}{15} = 0,0(6).$$

где K – капитальные вложения в технику, руб.

Расчет затрат на эксплуатацию:

Для целей технико-экономического анализа при проектировании необходимо принимать во внимание те статьи эксплуатационных расходов, значение которых изменяются с изменением вариантов конструкторских решений.

Например, величина амортизационных отчислений в составе эксплуатационных расходов связана с ценой, а, следовательно, с себестоимостью и все изменения параметров влияющих на себестоимость, влияют и на размеры эксплуатационных затрат. Расходы на текущий ремонт зависят от надежности разрабатываемой модели, варианты его конструкции.

Такая статья эксплуатационных расходов, как заработная плата персонала, обслуживающего оборудование, практически не изменяется от варианта к варианту проектного решения, если только обслуживание оборудования не заменяется автоматическим управлением.

Таким образом, затраты на эксплуатацию можно определить по формуле (6.6):

$$I = Z'_{nl} + Z_a + Z_{mp}, \quad (6.6)$$

где Z'_{nl} – заработная плата на годовую программу, руб/год;

Z_a – амортизационные отчисления, руб/год;

Z_{mp} – затраты на текущий ремонт, руб/год.

$$I = 160900 + 51430 + 21430 = 233700 \text{ руб / год};$$

$$Z_{np} = 233700 + 0.11 \cdot 22306.9 = 236200 \text{ руб / год}.$$

6.3 Расчет цены оборудования с учетом КПТУ

Одним из основных направлений совершенствования ценообразования на новую модель является более полный учет в цене технического уровня и качества изделия.

В соответствии с отраслевой методикой ценообразование оптовая цена определяется по формуле (7):

$$C_n = C_b \times [1 + (КПТУ - 1) \times 0,7] \times 0,9, \quad (6.7)$$

где C_n , C_b - цена новой и базовой модели, руб;

0,7 – коэффициент учета полезного эффекта в цене нового оборудования;

0,9 – коэффициент удешевления, корректирующий преysкурaнтную цену базовой модели и характеризующий моральное старение базового изделия за период проектирования и освоение новой техники.

$$C_n = 12691 \cdot [1 + (1,7642 - 1) \cdot 0,7] \cdot 0,9 = 17531,93 \text{ руб.}$$

Определяем капитальные вложения с учетом 8% транспортных перевозок и монтажа по формуле (8):

$$K_{\text{ВЛОЖ}} = C_n \times 1,08, \tag{6.8}$$

$$K_{\text{ВЛОЖ}_{\text{нм}}} = 17531,93 \cdot 1,08 = 18934,48 \text{ руб.},$$

$$K_{\text{ВЛОЖ}_{\text{бм}}} = 12691 \cdot 1,08 = 13706,28 \text{ руб.}$$

Определяем амортизационные отчисления:

$$Z_a = \frac{C \times M \times a}{100}, \tag{6.9}$$

где C – балансовая стоимость оборудования, руб;

M – коэффициент, учитывающий время использования оборудования;

a – норма амортизационных, %.

Принимаем, $a = 20\%$.

$$Z_{\text{анм}} = \frac{18934,48 \cdot 1 \cdot 20}{100} = 3786,89 \text{ руб / год},$$

$$Z_{\text{абм}} = \frac{13706,28 \cdot 2,36 \cdot 20}{100} = 6469,64 \text{ руб / год}.$$

Определяем затраты на ремонт оборудования:

$$Z_{трим} = \frac{W(P+k)}{T_{рц}} \times 1890, \quad (6.10)$$

где W – затраты на все виды планово-предупредительного ремонта за ремонтный цикл, приходившийся на единицу ремонтной сложности механической и энергетической части данного вида оборудования, руб;

P и k – группа ремонтной сложности механической и энергетической части оборудования;

$T_{рц}$ - длительность ремонтного цикла основной части оборудования, ч.

$$Z_{трим} = \frac{500(16,5 + 4,5)}{6720} \cdot 1890 = 2953,12 \text{ руб} / \text{год}.$$

$$Z_{трбм} = Z_{трим} \times 1,67, \quad (6.11)$$

$$Z_{трбм} = 2906,25 \cdot 1,67 = 4853,43 \text{ руб} / \text{год}.$$

Определяем заработную плату:

$$Z_{плнм} = C_{гi} \times k_p \times k_{пр} \times k_n \times k_d \times k_{осн} \times 1890, \quad (6.12)$$

где $C_{гi}$ - часовая тарифная ставка соответствующего разряда, руб/ч;

k_p , $k_{пр}$, k_n , k_d , $k_{осн}$ - коэффициенты, учитывающие районную и северную надбавку к заработной плате, приработок рабочего (доплаты за ночные часы, за учеников и бригадирство), доплату по премиальным системам, дополнительную заработную плату, отчисления на социальные нужды.

$$Z_{плнм} = 116,23 \cdot 1,2 \cdot 1,4 \cdot 1,12 \cdot 1,171 \cdot 1890 = 484021 \text{ руб} / \text{год}.$$

$$Z_{плбм} = Z_{плнм} \times 1,67, \quad (6.13)$$

$$Z_{плбм} = 484021 \cdot 1,67 = 808315 \text{ руб} / \text{год}.$$

Определяем затраты на эксплуатацию по формуле (6.14):

$$I = Z_{нл} + Z_a + Z_{пр}, \quad (6.14)$$

$$I_{нм} = 484021 + 3786,89 + 2906,25 = 490714,14 \text{ руб / год},$$

$$I_{бм} = 808315 + 6469,64 + 4853,43 = 819638,07 \text{ руб / год}.$$

Определяем приведенные затраты по формуле (6.15):

$$Z_{пр} = I + E_n \times K_{влож}, \quad (6.15)$$

$$Z_{прнм} = 490714,14 + 0,06 \cdot 18934,48 = 491850,2 \text{ руб / год},$$

$$Z_{прбм} = 819638,07 + 0,06 \cdot 13706,28 = 820460,44 \text{ руб / год}.$$

Определяем экономию на приведенных затратах:

$$\mathcal{E}_{пр} = Z_{прбм} - Z_{прнм}, \quad (6.16)$$

$$\mathcal{E}_{пр} = 820460,44 - 491850,2 = 328610,24 \text{ руб / год}.$$

Ожидаемые технико-экономические показатели представлены в таблице 3.

Таблица 18 – Ожидаемые технико-экономические показатели

№	Наименование показателей	Единицы измерения	Значение показателей по вариантам	
			базовому	новому
1	Затраты на эксплуатацию:	руб/год	819638,07	490714,14
	а) заработная плата основных рабочих с отчислениями на социальные нужды	руб/год	808315	484021
	б) амортизация оборудования	руб/год	6469,64	3786,89
	г) затраты на ремонт оборудования	руб/год	4853,43	2906,25

Окончание таблицы 19

2	Экономия эксплуатационных издержек	руб/год	-	328923,93
3	Капитальные вложения	руб.	13796,28	18934,48
4	Приведенные затраты	руб/год	820460,44	491850,2
5	Экономия на приведенных затратах	руб/год	-	328610,24

Вывод.

1. Экономия на приведенных нового двигателя по сравнению с базовым вариантом составляет 328610,24 руб/год.
2. Экономия эксплуатационных издержек нового двигателя по сравнению с базовым составляет 328923,93 руб/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были применены на практике методы идентифицирования параметров асинхронного двигателя. Идентификация параметров схемы замещения на основе Micromaster основана на построении частотным преобразователем математической модели асинхронного двигателя посредством программного обеспечения STARTER. Выполнена полная параметризация, которая позволяет оценить исправность электродвигателя.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Идентификация систем [Электронный ресурс] : материал из Википедии, ред. от 12.09.17 // Википедия. –Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>.
2. Каширских, В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: Монография / В. Г. Каширских. – Кемерово : ГУ КузГТУ, 2005. – 139 с.
3. Каширских, В. Г. Определение параметров асинхронных электродвигателей в процессе их работы / В. Г. Каширских // Вестник Кузбасский государственный технический университет. – 2015. - №5. С. 96-102.
4. ПАТЕНТ РФ № 2406096 С1. Способ определения активного сопротивления статора асинхронного двигателя / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский, А. Н. Гаргаев. Заявл. 20.11.2009 №2009143046/28. Опубл. 10.12.10. Бюл. № 34.
5. ПАТЕНТ РФ № 2439599 С1. Способ определения потокосцепления статора асинхронного двигателя / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский, А. Н. Гаргаев. Заявл. 16.11.2010 №2010146668/28. Опубл. 10.01.12. Бюл. 1.
6. Каширских, В. Г. Определение кривой намагничивания магнитопровода асинхронного электродвигателя по результатам испытания на холостом ходе / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Д. В. Соколов // Вестник Кузбасский государственный технический университет. – 2002. - №2. С. 14-16.
7. Руководство пользователя преобразователей MICROMASTER 440.
8. Аристов, А. В. Математическое моделирование в электромеханике : учеб. пособие / А. В. Аристов, Л. К. Бурулько, Л. А. Паюк. – Томск : Томский политехнический университет, 2005. – 155 с.
9. Федоров, С. А. Энергосберегающий электропривод в системах водоснабжения : дис. ... : 63215/12 / Федоров С. А. – Санкт-Петербург, 2014. – 107 с.

					БР – 15.03.06 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		78

10. Рыбин, А. А. Привод переменного тока : лабораторный практикум / А. А. Рыбин. – Красноярск : Министерство образования и науки РФ СФУ, 2010. – 100 с.

11. Векторное управление двигателем [Электронный ресурс] : Интеграция систем контроля, автоматизации и мониторинга // Инженерные решения. – 2012 - 2017. – Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector>.

12. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

					<i>БР – 15.03.06 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		79

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Робототехника и техническая кибернетика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Г.Б.Масальский

подпись инициалы, фамилия


« 22 » июня 2017 г

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Идентификация параметров асинхронного двигателя на основе
Micromaster

Руководитель

 22.06.17 доц. к.т.н. А. П. Смольников
подпись, дата должность, учёная степень

Выпускник

 22.06.17 Я. С. Каширская
подпись, дата

Нормоконтролёр

 22.06.17 В. Н. Куликова
подпись, дата

Красноярск 2017