

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

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, профессор, д.т.н.

\_\_\_\_\_/М.М. Дудкин/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДТС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ  
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2018.028 ВКР**

*Руководитель проекта:*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/А.Н. Горожанкин/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Автор проекта*

*студент группы П - 286*

\_\_\_\_\_/А.П. Чернядьева/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Нормоконтролер*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск

2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Чернядьева А.П. Моделирование DTC систем управления электроприводами переменного тока. – Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2018, 45с., 18ил., 3табл., библиографический список – 12наим.

В выпускной квалификационной работе происходит моделирование DTC систем управления электроприводами переменного тока. Структура работы представлена введением, двумя главами, заключением, списком литературы. Во введении раскрывается актуальность выбранной темы, описываются цели и задачи выпускной квалификационной работы. В первой главе изложена идея и практическая реализация прямого управления моментом асинхронного двигателя, результаты моделирования. Вторая глава посвящена идеи и практической реализации прямого управления моментом синхронного двигателя, приведены результаты моделирования. В заключении обобщается проделанная работа, и формируются выводы.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</b>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>аДа</i>	тока Моделирование DTC систем управления электроприводами переменного тока			<i>т.</i>	<i>ст</i>	<i>ов</i>
<i>раб.</i>		Чернядьева А.П.								
<i>вер.</i>		Горожанкин А.Н.								
<i>нз</i>										
<i>Контр.</i>		Бычков А.Е.								
<i>верд.</i>		.Шишков А.Н.			<b>«АЭП» ЮУрГУ Кафедра «АЭП»</b>					

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	9
1.1 Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.....	9
1.2 Векторное управление асинхронным двигателем.....	13
1.3 Скалярное управление асинхронным двигателем.....	15
1.4 Разработка системы прямого управления моментом АД.....	18
1.5 Моделирование ПУМ асинхронного двигателя.....	25
1.6 Выводы.....	27
2 СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	29
1.1 Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.....	29
1.2 Векторное управление асинхронным двигателем.....	32
1.3 Разработка системы прямого управления моментом АД.....	37
1.4 Моделирование ПУМ асинхронного двигателя.....	39
1.5 Выводы.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	44

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Электропривод является неотъемлемой частью многих агрегатов и комплексов, используемых в различных отраслях народного хозяйства, науки и техники. Как следствие электропривод занимает лидирующие позиции по потреблению электроэнергии.

Существующие методы регулирования скорости вращения двигателей обеспечивают поддержание требуемых параметров, но зачастую не являются энергоэффективными, например, реостатное регулирование. Данную проблему можно решить внедрением автоматизированных электроприводов с управляемыми электрическими машинами.

Широкое внедрение управляемых электроприводов позволило снизить потребление электроэнергии, что значительно повлияло на энергоэффективность, так как электропривод потребляет около 60% всей производимой в мире электроэнергии, и, следовательно, является основным её потребителем. Поэтому в современных условиях задача эффективного использования электроэнергии важна не меньше, чем обеспечение необходимого, с точки зрения технологического процесса, управления электроприводом.

Из-за стремительного развития технологий в современном мире растут требования к электроприводу. К ним относятся: обеспечение высокой точности движения, быстродействия, надежности, уменьшение вносимых приводом искажений в сеть. Для реализации необходимых условий применяются как «новые», по своим конструктивным особенностям, электродвигатели, так и «новые» системы управления.

В настоящее время используются скалярные и векторные системы управления электроприводами переменного тока.

**Объект исследования** – асинхронный короткозамкнутый двигатель, синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

**Предмет исследования** – способы управления асинхронным короткозамкнутым двигателем, синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов.

**Целью** диссертационной работы является исследование и моделирование прямого управления моментом асинхронного и синхронного электроприводов.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- Определить влияние конструктивных особенностей и принципа работы асинхронной и синхронной машин переменного тока на алгоритмы управления;
- Систематизировать сведения по современным способам управления электроприводами переменного тока;
- Исследовать и моделировать систему прямого управления моментом асинхронными и синхронными электроприводами переменного тока.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

- Теория электропривода и систем управления электроприводов;
- методы численного моделирования (MATLAB);
- компьютерные методы экспериментальных исследований.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** подтверждена компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями на моделях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Идея и практическая реализация прямого управления моментом асинхронной машины, результаты моделирования;

2. Идея и практическая реализация прямого управления моментом синхронной машиной с постоянными магнитами на роторе, результаты моделирования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения, изложенных на страницах машинописного текста, содержит рисунков, таблиц, список используемой литературы из наименований.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

# 1 СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## 1.1 Устройство и принцип действия асинхронного двигателя

**Асинхронный двигатель (АД)** является одним из самых распространенных и исследованных двигателей переменного тока (рисунок 1.1). Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: прост и удобен в эксплуатации, у двигателя с короткозамкнутым ротором отсутствуют щетки, дешевле и легче двигателя постоянного тока при одинаковых мощностях, при распределении электроэнергии на переменном токе не нужны преобразовательные установки [2].

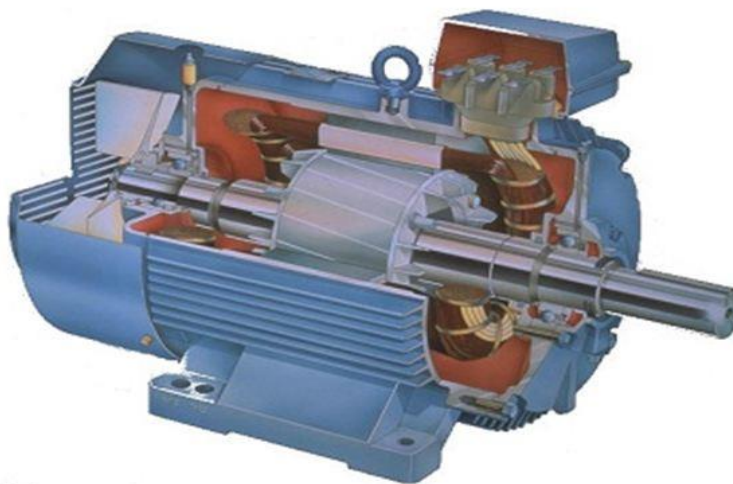


Рисунок 1.1 – Асинхронный двигатель с фазным ротором

**Устройство асинхронной машины.** Сердечник статора собирается из листов электротехнической стали и закрепляется в корпусе, а сердечник ротора – на валу (машины малой и средней мощности) или на ободке с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности).

На внутренней цилиндрической поверхности статора и на внешней цилиндрической поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются

проводники обмоток статора и ротора. Обмотка статора выполняется обычно трехфазной из медной проволоки с изоляцией, присоединяется к сети трехфазного тока и называется, поэтому первичной обмоткой. Обмотка ротора тоже может быть выполнена трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно в «звезду», а начала с помощью колец и металлографитных щеток выводятся наружу. Такая асинхронная машина называется машиной с фазным ротором, машиной с контактными кольцами или фазной асинхронной машиной[2,7].

Другой разновидностью обмотки ротора является обмотка в виде «беличьей клетки» (рисунок 1.2). В каждом пазу ротора находится медный или алюминиевый стержень, и концы всех стержней с обоих торцов ротора соединены с медными или алюминиевыми же кольцами, которые замыкают стержни накоротко. Такая асинхронная машина называется машиной с короткозамкнутым ротором, или короткозамкнутой. Большинство асинхронных машин, в особенности машины малой и средней мощности, выпускаются с короткозамкнутым ротором[1].

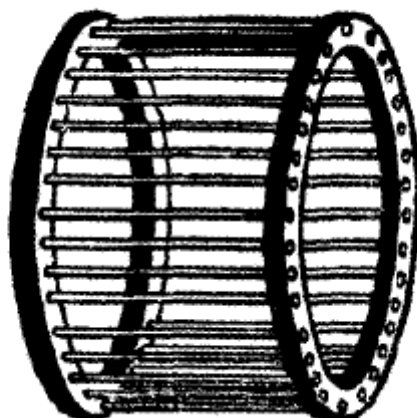


Рисунок 1.2 – Короткозамкнутая обмотка ротора в виде «беличьей клетки»

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных машинах выполняют минимальным с условием производства и надежности работы, и тем больше, чем крупнее машины.



**Принцип действия асинхронных машин.** Если симметричная трехфазная обмотка якоря подключена к симметричной системе трехфазного напряжения частотой  $f_1$ , то система фазных токов, также симметричная, возбудит в воздушном зазоре вращающееся магнитное поле. Это поле можно представить в виде симметричной системы вращающихся магнитных полюсов, число которых равно  $2p$ [1].

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (1.1)$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля статора;

$f_1$  – частота сети (частота токов в статоре);

$p$  – число пар полюсов.

Магнитный поток каждого такого полюса  $\Phi_1$  при вращении пересекает проводники обмотки ротора и тем самым индуцирует в них ЭДС  $e_2$ . Если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи  $i_2$ , частота которых  $f_2$  при неподвижном роторе ( $n=0$ ) равна первичной частоте  $f_1$ . Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора  $\Phi_2$  (число полюсов  $2p$ ), направление и частота вращения которого при  $n=0$  такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки статора  $\Phi_1$  и ротора  $\Phi_2$  вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя  $\Phi_\delta$ . При короткозамкнутом роторе в его стержнях индуцируется многофазная система токов со сдвигом в соседних стержнях по фазе. Эти токи также создают вращающийся поток  $\Phi_2$ , число полюсов, направление и скорость вращения которого совпадают с потоком фазного ротора. При увеличении скорости ротора частота тока  $i_2$  и его амплитуда уменьшаются.

При взаимодействии токов ротора с вращающимся магнитным потоком возникают действующие на проводники ротора электромагнитные силы  $F$  и вращающийся электромагнитный момент  $M$ .

Цепь ротора асинхронного двигателя всегда обладает определенным активным сопротивлением, и поэтому при пуске двигателя ( $n=0$ ) угол

сдвига фаз  $\psi_2$ , всегда  $0 < \psi_2 < 90^\circ$ . В результате  $M > 0$ , и если он больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя начнет вращаться в направлении вращения поля с некоторой частотой вращения  $n < n_1$ , то есть будет вращаться с некоторым отставанием, или скольжением, относительно поля статора. Относительная разность скоростей вращения поля и ротора называется скольжением [1].

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (1.2)$$

где  $s$  – скольжение;

$n$  – частота вращения ротора.

Частота вращения ротора, выражается через скольжение, согласно формуле (1.2), и равна:

$$n = (1 - s)n_1. \quad (1.3)$$

При пуске двигателя ( $n=0$ ) имеем  $s=1$ , а при вращении ротора синхронно с полем статора, или, как говорят, с синхронной частотой вращения ( $n=n_1$ ),  $s=0$ . При  $n=n_1$  магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи в роторе индуцироваться не будут, поэтому  $M=0$  и такой частоты вращения двигатель самостоятельно достичь не может. Вследствие этого в режиме двигателя всегда  $0 < n < n_1$  и  $1 > s > 0$ .

Если ротор асинхронной машины с помощью внешней силы (вращающегося момента) привести во вращение в направлении вращения поля статора с частотой вращения выше синхронной, то ротор будет обгонять поле. Момент при этом будет тормозящим, а машина станет работать в режиме генератора и отдавать активную мощность в сеть. Согласно выражению (1.2), в режиме генератора  $s < 0$ .

Если ротор вращать в направлении, обратном направлению вращения поля статора ( $n < 0$ ). Электромагнитный момент  $M$  будет действовать в направлении вращения поля статора и тормозить вращение ротора. Этот режим работы асинхронной машины называется режимом

противовключения, или режимом электромагнитного тормоза. В этом режиме в соответствии с выражением (1.2)  $s > 1$ .

## 1.2. Векторное управление асинхронным двигателем

В большинстве современных высококачественных регулируемых электроприводов переменного тока реализован принцип «векторного регулирования» электромагнитного момента. Основным выражением описывающий этот принцип, является выражение для электромагнитного момента [4]:

$$M = K |\vec{\Psi}_p \cdot \vec{\Psi}_c| = K |\vec{\Psi}_p \cdot \vec{\Psi}| = K |\vec{\Psi}_c \cdot \vec{\Psi}|, \quad (1.4)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;

$\vec{\Psi}_p$  – вектор потокосцепления ротора;

$\vec{\Psi}_c$  – вектор потокосцепления статора.

Широкое распространение в системах векторного управления получил способ ориентации переменных по вектору потокосцепления ротора.

Изобразим упрощенную векторную диаграмму (рисунок 1.3), построенную с допущением, что в двигателе нет потоков рассеяния и отсутствует падение напряжения в цепи обмоток статора.

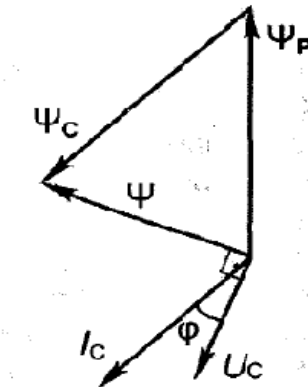


Рисунок 1.3 – Диаграмма потокосцеплений

Площадь, ограниченная векторами-слагаемыми  $\psi_p$  и  $\psi_c$  и вектором суммы  $\psi$ , пропорциональна величине электромагнитного момента. Площадь электромагнитного момента найдем по формуле (1.5).

$$M=2kS_{\Delta}. \quad (1.5)$$

С учетом сказанного сформулируем первое правило векторного регулирования электромагнитного момента: чтобы косвенным способом регулировать величину электромагнитного момента в электрической машине, достаточно каким-либо способом изменить площадь моментного треугольника, соответствующего выражению (1.6) [4,8]:

$$\vec{\psi}=\vec{\psi}_p+\vec{\psi}_c. \quad (1.6)$$

Второе правило векторного регулирования электромагнитного момента: чтобы при регулировании момента электродвигателя добиться оптимальных режимов работы электропривода, необходимо в соответствии с выбранными критериями оптимизации соблюдать (с помощью системы регулирования) определенную форму моментного треугольника этого электродвигателя[4,8].

Существуют разные пути реализации построения моментного треугольника:

- 1) Треугольник можно построить по трем сторонам;
- 2) Моментный треугольник можно построить по двум сторонам и углу между ними (то есть по величинам  $\vec{\psi}_p$  и  $\vec{\psi}_c$  и углу между этими векторами).
- 3) Моментный треугольник можно строить по величине тока ротора  $I_p$  и проекциям вектора тока статора на продольную и поперечную оси электрической машины (оси  $d$  и  $q$ ).

Диапазон возможных конфигураций моментного треугольника асинхронного двигателя оказывается, ограничен по причине недоступности роторной цепи для воздействия. Хотя схемное разнообразие асинхронных частотно-регулируемых электроприводов весьма велико,

однако в конечном итоге преобладают два варианта формирования моментного треугольника:

- 1) Асинхронный электродвигатель при регулировании момента в процессе поддержания заданного значения скорости поддерживается постоянство магнитного потока.
- 2) Регулирования в электроприводе стремятся вести с минимальными или почти минимальными потерями (поддержание постоянства скольжения).

Разделяют два основных вида систем векторного регулирования (без датчика скорости) и системы с датчиком обратной связи по скорости. Отсутствие обратной связи по скорости увеличивает объем расчетов в системе управления, и как следствие усложняет её.

Векторное регулирование момента асинхронного двигателя обеспечивает точное поддержание электромагнитного момента и устойчивую работу электропривода во всем диапазоне скоростей. Это можно выгодно отличает от скалярного регулирования.

### 1.3. Скалярное управление асинхронным двигателем

Преимущественное применение в настоящее и ближайшее будущее время имеют электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. В связи с резким удешевлением статических преобразователей частоты быстро увеличивается доля частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. При этом целесообразны наиболее простые способы регулирования, при которых по двум параллельно работающим каналам задают пропорционально частоту и величину напряжения на статоре (известный закон  $U/f_c = \text{const}$ ). В современной литературе эти системы получили название систем скалярного управления [3].

Как правило, независимым воздействием является частота, а напряжение, соответствующее данной частоте, обосновывает вид механической характеристики, значение критического момента и пускового.

Существуют следующие статические законы частотного регулирования напряжения:

- 1) При постоянстве статического момента  $M_c = \text{const}$  и момент статический равен моменту номинальному, тогда закон регулирования напряжения принимает вид:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} = \text{const} \quad (1.7)$$

где  $U_1$  – напряжение на статоре;

$U_{1H}$  – номинальное напряжение;

$f_{1H}$  – номинальная частота.

Или

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}. \quad (1.8)$$

При таком законе управления требуется, чтобы при регулировании частоты напряжение изменялось пропорционально. Механическая характеристика при таком соотношении приведена на (см. рисунок 1.4). Критический момент для принятых в законе допущений остается постоянным.

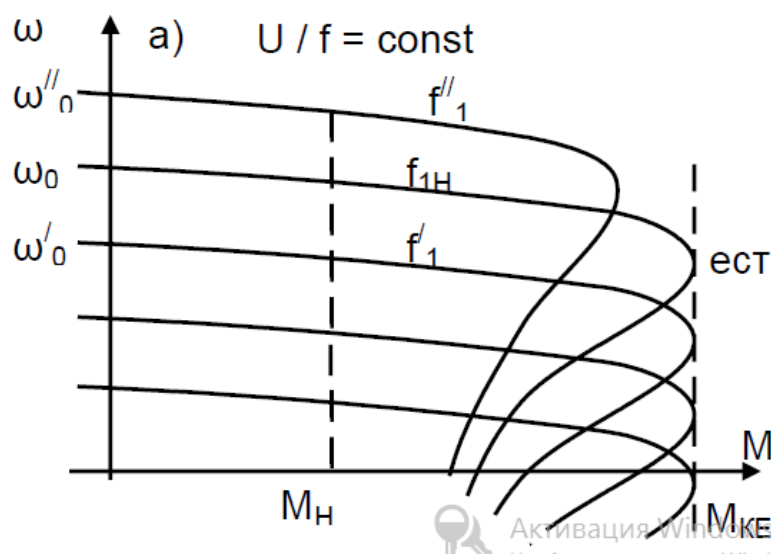


Рисунок 1.4 – Механическая характеристика

- 2) При постоянстве статической мощности и равенства статической и номинальной мощности статический момент изменяется обратно пропорционально скорости:

$$M_c = \frac{P_c}{\omega} = \frac{M_n \cdot \omega_n}{\omega}, \quad (1.8)$$

где  $M_c$  – момент статический;

$P_c$  – мощность статическая;

$\omega$  – текущая угловая скорость;

$M_n$  – момент номинальный;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость.

Закон регулирования напряжения принимает вид:

$$\frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{f_1}{f_{1n}} \cdot \sqrt{\frac{M_n \cdot \omega_n}{M_n \cdot \omega}} = \frac{f_1}{f_{1n}} \cdot \sqrt{\frac{f_{1n}}{f_1}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{1n}}}. \quad (1.9)$$

Или

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{f_{1n}}} = const. \quad (1.10)$$

- 3) Для идеальной вентиляторной нагрузки статический момент изменяется по закону:

$$M_c = M_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2. \quad (1.11)$$

Закон регулирования напряжения принимает вид:

$$\frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{f_1}{f_{1n}} \cdot \sqrt{\frac{M_n \cdot \omega_n^2}{M_n \cdot \omega^2}} = \frac{f_1}{f_n^2}. \quad (1.12)$$

Или

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (1.13)$$

- 4) Когда  $f_1 > f_{1n}$  представленные выше законы не допустимы по условиям электрической прочности изоляции ( $U_1 \leq U_n$ ). Регулирование ведется при поддержании постоянства напряжения на статоре.

Максимальное значение частоты и скорости ограничивается по условиям механической прочности. Значение критического момента

двигателя  $M_{К\text{ ИСК}}$  при  $f_1 > f_{1н}$  и  $U_1 = \text{const}$  снижается пропорционально квадрату частоты:

$$M_{К\text{ ИСК}} = M_{К\text{ ЕСТ}} \cdot \frac{f_{1н}^2}{f_1^2} \quad (1.14)$$

где  $M_{К\text{ ЕСТ}}$  - критический момент естественной характеристики.

Из рассмотренных выше статических законов частотного регулирования основным является закон  $U/f = \text{const}$ , при котором напряжение на статоре изменяется пропорционально частоте (или напряжение задания частоты).

К достоинствам данного вида управления можно отнести следующие свойства:

- 1) Постоянство перегрузочной способности на всех, кроме низких, частотах;
- 2) Относительная простота реализации преобразователей с данным типом управления;
- 3) Относительная дешевизна преобразователя со скалярным управлением;
- 4) Возможность использования скалярного управления в групповом электроприводе, при питании от одного преобразователя нескольких двигателей.

К недостаткам можно отнести следующие признаки:

- 1) Резкое снижение нагрузочной способности на низких частотах ( $f \leq 0,1 f_{н}$ );
- 2) Невозможность регулирования момента на валу двигателя. Этот недостаток можно устранить введением датчика момента, но он сложно реализуемый и дорогостоящий. Кроме того, при данном типе управления невозможно одновременное регулирование момента и скорости, поэтому приходится выбирать одну из этих величин.

Такое управление встречается в электроприводах, к которым не предъявляются повышенные статические и динамические требования (привода насосов, вентиляторов и т.д.).

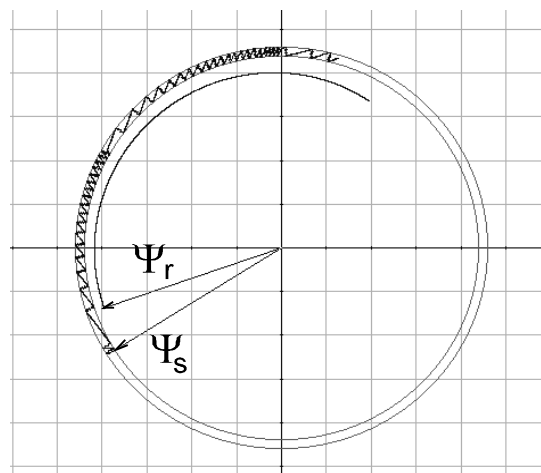
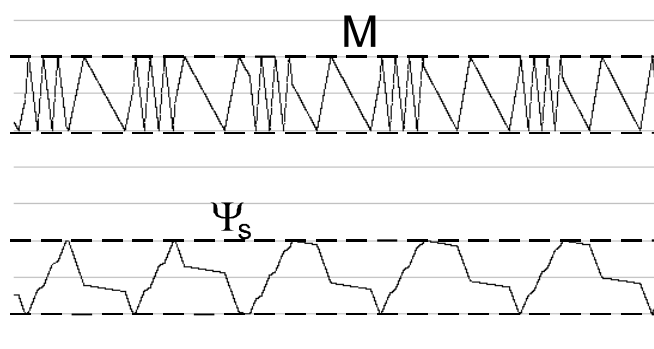


#### 1.4. Разработка системы прямого управления моментом АД

**Принцип прямого управления моментом АД.** Метод прямого управления моментом (ПУМ) был предложен в середине 80-х. Однако его промышленная реализация стала возможна только в середине 90-х, с появлением высокоточной быстродействующей микропроцессорной техники предложенной фирмой АВВ. Серийно выпускаются преобразователи частоты ACS800 и другие. В настоящее время ПУМ является наиболее современным способом управления частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами.

Теория ПУМ основана на принципах векторного управления, но при этом является принципиально новой стратегией управления ПЧ-АД. В отличие от систем с ориентацией поля, системы с ПУМ не включают в себя контуры регулирования проекций тока статора, определяющих электромагнитный момент и поток. В новых системах контуры регулирования потока и момента являются внутренними. Основная идея управления заключается в том, что на каждом шаге расчета определяется оптимальное состояние инвертора напряжения, то есть такое, которое вызовет изменение момента и потока статора в нужную сторону, чтобы свести к нулю ошибку между заданными и действительными значениями регулируемых величин. Таким образом, происходит исключение широтно-импульсного модулятора из системы, как отдельное звено. Состояние силовых ключей изменяется не на каждом шаге расчета. В данном случае используется так называемое гистерезисное управление. Суть его состоит в том, что регулируемые величины поддерживаются в заданных пределах. Другими словами, изменение состояния инвертора происходит только тогда, когда модуль ошибки по моменту или по потоку превышает граничное значение. Очевидно, что чем больше этот допуск, тем меньше частота коммутации вентиляей и тем хуже качество регулирования. Для иллюстрации рассматриваемого принципа управления рассмотрим формы кривых момента и потока статора (рисунок

1.5) показаны диаграммы изменения электромагнитного момента и потокосцепления статора. Причем момент и потокосцепление статора показаны на временной диаграмме (рисунок 1.5а), а траектории векторов потокосцепления статора и ротора показаны в неподвижной системе координат (рисунок 1.5б).



а)

б)

Рисунок 1.5 – Форма кривых момента и потока статора

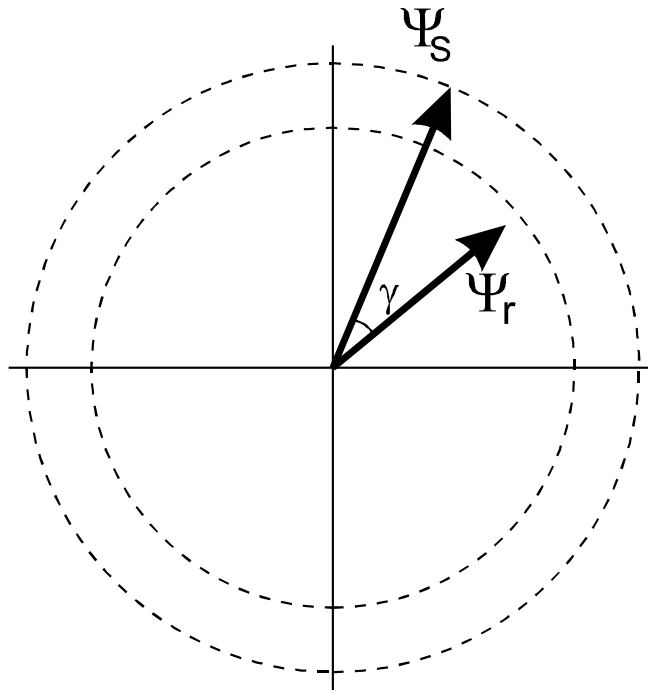


Рисунок 1.6 – Векторы потоков статора и ротора в неподвижной системе координат

Чтобы показать, каким образом реализуется описанная выше стратегия управления, рассматривается неподвижная система координат (рисунок 1.6). Известно, что электромагнитный момент асинхронного двигателя можно записать через векторное произведение потокоцеплений статора и ротора. Другими словами, момент пропорционален произведению модулей потокоцеплений и синуса угла между ними [7]:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{pL_m}{L_s L_r - L_m^2} \psi_s \psi_r \sin \gamma, \quad (1.15)$$

где  $L_s$  – индуктивность статора;

$L_r$  – индуктивность ротора;

$\gamma$  – угол между векторами потоков статора и ротора.

Модуль потока статора, как правило, поддерживается постоянным (в заданных пределах). Модуль потока ротора меняется очень медленно по сравнению с потоком статора из-за большой постоянной времени ротора. Таким образом, регулирование момента осуществляется в основном путем

воздействия на угол между этими двумя векторами. Возможность такого регулирования вытекает из следующего уравнения:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = U_s - I_s R_s, \quad (1.16)$$

где  $U_s$  – напряжение на статоре;

$I_s$  – ток на статоре;

$R_s$  – сопротивление на статоре.

или, если пренебречь падением напряжения в статорной обмотке:

$$\frac{d\psi_s}{dt} \approx U_s, \quad (1.14)$$

Указанное допущение можно принять потому, что в данном случае достаточно рассмотреть лишь направление изменения вектора  $\psi_s$ . Очевидно, что вектор приращения потока статора будет иметь приблизительно то же направление, что и вектор напряжения статора. Задача состоит в том, чтобы правильно выбрать один из векторов напряжения, обеспечиваемых инвертором.

Соответствие секторов и векторов напряжения неподвижной системы координат (рисунок 1.7). Изображены восемь векторов напряжения и состояния ключей инвертора, соответствующие этим векторам. Векторы  $U_1$ – $U_6$  принято называть активными, а векторы  $U_0$  и  $U_7$ – нулевыми.

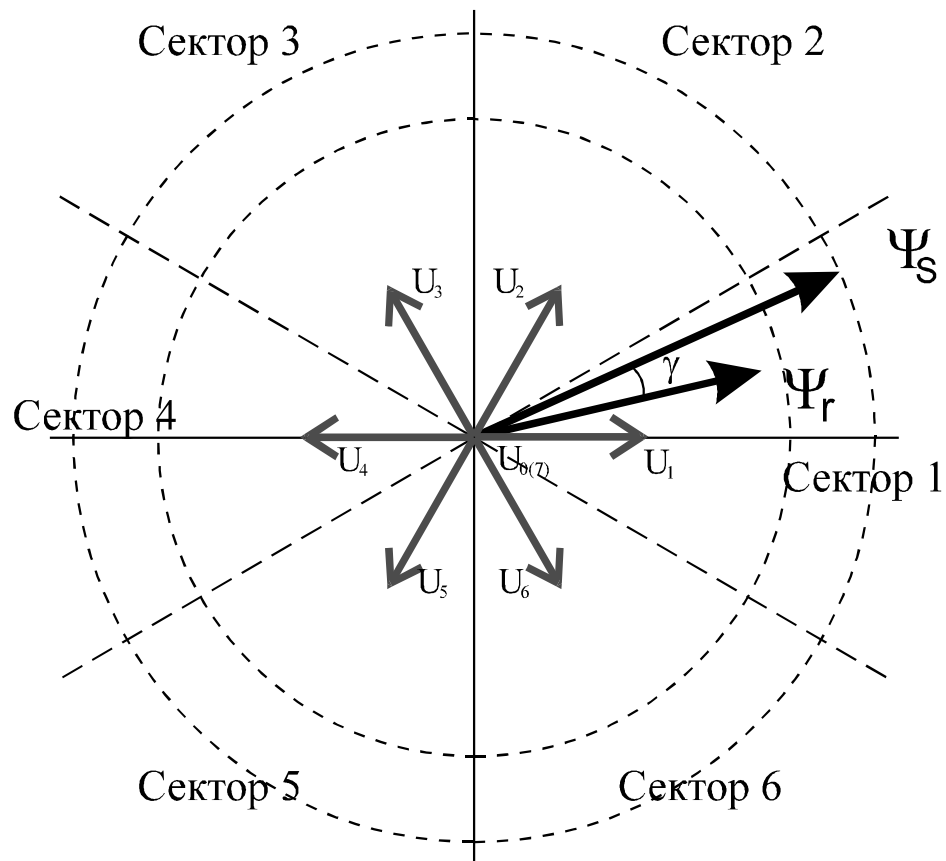


Рисунок 1.7– Соответствие секторов и векторов напряжений в неподвижной системе координат

Оптимальный вектор выбирается следующим образом. Плоскость вращения векторов, разбивается на шесть равных секторов. Рассматривается один из них. В частности, пусть вектор потока статора находится в первом секторе. Если в данный момент времени необходимо увеличить момент, то следует применять один из опережающих векторов  $U_2$  или  $U_3$ . Оба этих вектора вызовут увеличение угла  $\gamma$  и, следовательно, увеличение момента. Причем первый из них применяется в том случае, если надо увеличить модуль потока статора, а второй – при его уменьшении. Для уменьшения момента обычно применяется один из нулевых векторов ( $U_0$  или  $U_7$ ). Нулевой вектор напряжения вызывает "остановку" вектора потока статора. При этом поток ротора продолжает вращаться, "догоняя" поток статора, что приводит к уменьшению момента. При малых частотах вращения двигателя поток ротора движется медленно, и в этом случае не удастся быстро уменьшить момент с

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

помощью нулевого вектора напряжения. Поэтому в таких ситуациях используют отстающий вектор напряжения  $U_5$  или  $U_6$  (соответственно при необходимости уменьшить или увеличить модуль вектора потока статора). Нулевой вектор напряжения не может применяться и в том случае, если надо увеличить поток статора. При этом также вместо нулевого вектора используется вектор  $U_6$ . Для пяти других секторов плоскости применяются аналогичные наборы векторов. Указанная логика включения сведена в таблицу (таблица 1.1). Именно такая стратегия управления приводится в литературных источниках [10,11].

Таблица 1.1 – Алгоритм выбора вектора напряжения

Номер сектора, в котором находится вектор потока статора		1	2	3	4	5	6
Увеличение Потока	Увеличение момента	2	3	4	5	6	1
	Уменьшение момента	6	1	2	3	4	5
Уменьшение Потока	Увеличение момента	3	4	5	6	1	2
	Уменьшение момента	0(7)	0(7)	0(7)	0(7)	0(7)	0(7)
	Резкое уменьшение момента	5	6	1	2	3	4

**Общая структура прямого управления моментом АД.** Структура системы ПУМ, реализующей рассматриваемый принцип управления (рисунок 1.8). Силовая часть электропривода состоит из преобразователя частоты (неуправляемый выпрямитель – инвертор напряжения на полностью управляемых ключах) и асинхронного двигателя.

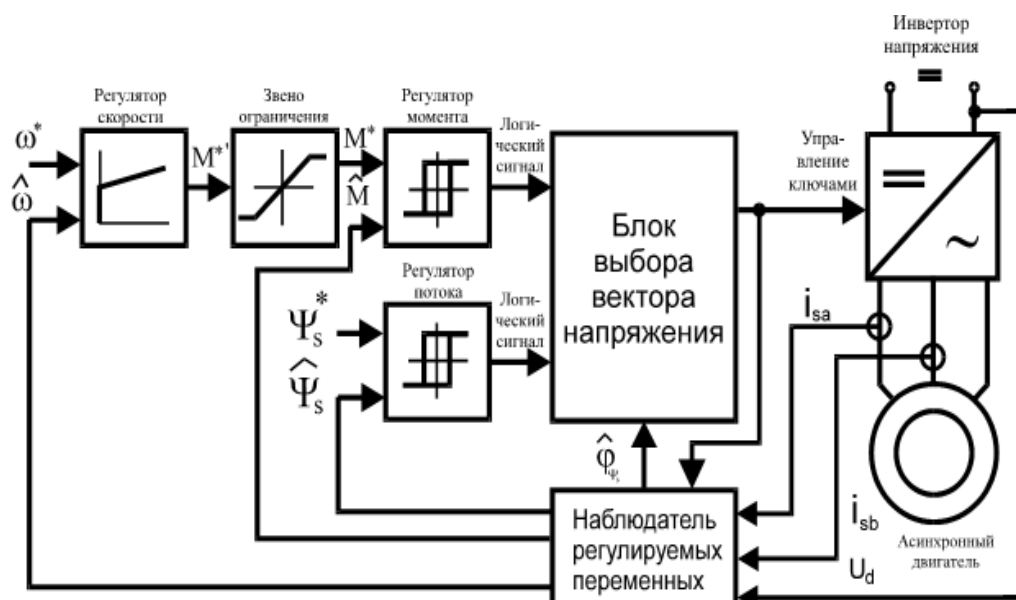


Рисунок 1.8 – Структура системы прямого управления моментом

Ядром системы являются контуры регулирования момента и потока статора. Они включают в себя релейные регуляторы и блок выбора вектора напряжения. Для упрощения релейные регуляторы показаны (см. рисунок 1.8), как элементы с простейшей гистерезисной характеристикой. На самом деле регулятор момента имеет более сложную структуру, реализующую алгоритм, описанный выше. Регуляторы сравнивают заданное значение регулируемых величин с действительными и выдают логические сигналы на блок выбора вектора напряжения. Кроме логических сигналов управления этот блок использует информацию о номере сектора (см. таблицу 1.1). Номер сектора определяется по углу вектора потока статора  $\psi_s$ . Выбранный вектор напряжения статора определяет текущее состояние силовых вентилялей.

Задание на момент формируется внешним контуром регулирования скорости вращения. Звено ограничения задания на момент задает максимально возможный уровень электромагнитного момента. Заданный поток статора обычно поддерживается постоянным, но может регулироваться в специальных режимах работы электропривода, таких как оптимизация энергопотребления, или регулирование скорости выше скорости идеального холостого хода [12].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Информация о действительных значениях регулируемых координат поступает с наблюдателя, который вычисляет значения потока, момента и скорости на основании измеренных мгновенных значений токов двух фаз, а также информации об уровне напряжения звена постоянного тока и текущего состояния инвертора напряжения.

### 1.5. Моделирование ПУМ асинхронного двигателя

**Описание модели.** Для оценки работоспособности предложенной системы ПУМ проведено моделирование в среде Matlab—Simulink. Модель, построенная на основании структурной схемы, представленной на рисунке 1.8 включает в себя: ПИ-регулятор скорости с параметрами  $k = 50$  и  $T = 0,0015$  с, звено ограничения, регулятор момента, регулятор потока, блок выбора вектора напряжения, трехфазный мостовой инвертор напряжения, наблюдатель регулируемых переменных, асинхронный двигатель.

Рассмотрим принцип работы схемы, приведенной на рисунке 1.9. Подаём сигнал на внешний контур скорости, с выхода регулятора скорости на контур задания момента, так как момент по обратной связи равен нулю, регулятор момента переключится в положительную сторону «один», регулятор потока переключится в «один». Начинается намагничиваться двигатель и увеличиваться момент, двигатель разгоняется. По достижению установившейся скорости, регулятор момента устанавливается в положение равное «нулю», и по достижению потока номинального значения регулятор потока устанавливается в нулевое значение «0». Работаем в установившемся режиме.



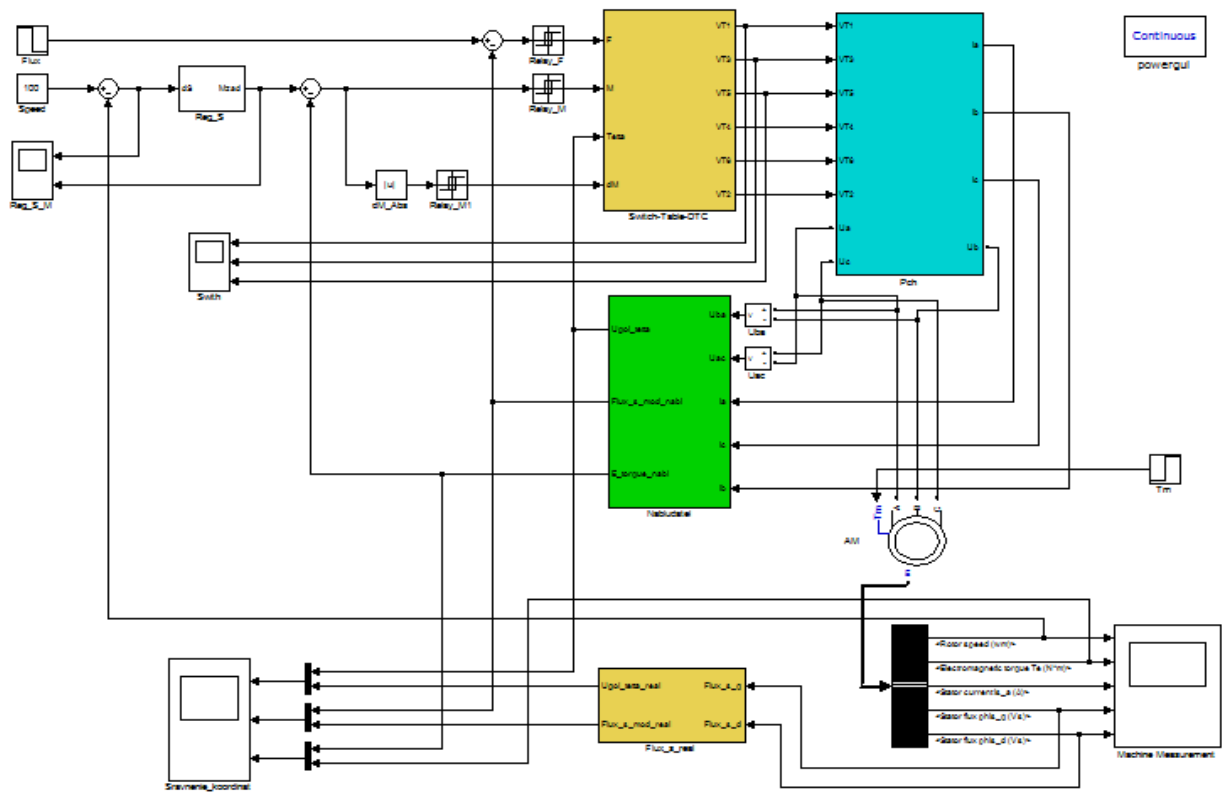


Рисунок 1.9 – Модель ПУМ асинхронного электропривода

**Результаты моделирования.** Результаты моделирования для асинхронного короткозамкнутого двигателя с параметрами приведенными в таблице (таблица 1.2) представлены на рисунке 1.10.

Таблица 1.2 – Параметры асинхронного двигателя

Номер	Параметр	Размерность	Значение
1	Мощность	кВт	15
2	Номинальное линейное напряжение	В	400
3	Номинальная частота	Гц	50
4	Активное сопротивление статора	Ом	0,215
5	Индуктивность рассеяния статора	Гн	0,000991
6	Приведенное активное сопротивление статора	Ом	0,2205
7	Индуктивность рассеяния ротора	Гн	0,000991
8	Взаимная индуктивность	Гн	0,06419

Продолжение таблицы 1.2

Номер	Параметр	Размерность	Значение
9	Момент инерции	кг*м <sup>2</sup>	0,102
10	Число пар полюсов	-	2
11	Номинальная скорость	об/мин	1460
12	Номинальный момент	Нм	98

На первом временном отрезке происходит разгон до заданной скорости в 100р/с. В момент времени 0,25с происходит ослабление поля в два раза. В момент времени 0,5с происходит наброс нагрузки в 150Нм. Система показывает быстрое нарастание момента и небольшую ошибку регулирования скорости.

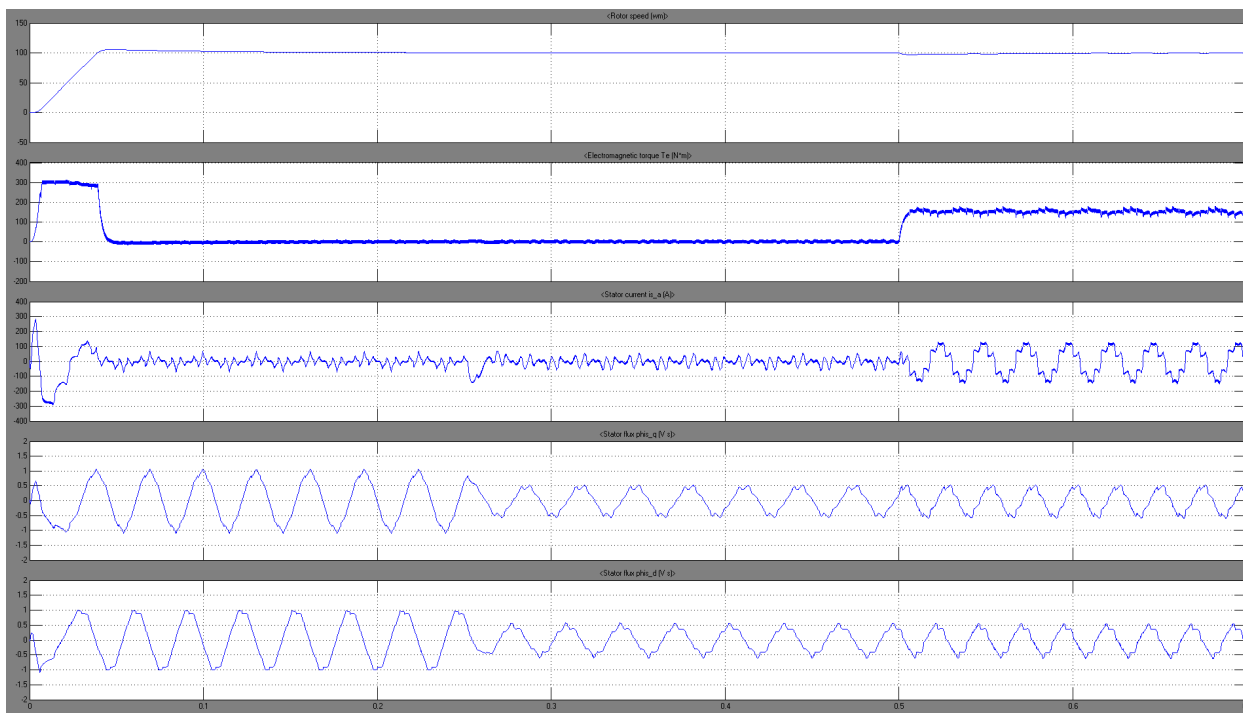


Рисунок 1.10 – Результаты моделирования

### 1.6. Выводы

1. Прямое управление моментом является векторным способом регулирования скорости асинхронного двигателя, позволяющем получать хорошую динамику электромагнитных процессов преобразования энергии.

Такая система может обходиться без датчиков скорости и не чувствительна к изменению параметров машины, например, активного сопротивления;

2. Результаты моделирования подтверждают теоретические предпосылки хорошей динамики системы электропривода с прямым управлением моментом.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

## 2 СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Устройство и принцип действия синхронного двигателя

**Синхронный двигатель (СД)** благодаря хорошим энергетическим показателям по КПД и коэффициенту мощности и повышенной надежности в связи со значительным воздушным зазором между статором и ротором все больше вытесняет асинхронные двигатели в мощных установках с длительным режимом работы. СД стал монополюсным для крупных компрессоров и насосов, для главных приводов непрерывных регулируемых прокатных станков, для приводов большой и средней мощности в цементной промышленности[2].

**Устройство СД.** Синхронные машины (рисунок 2.1) вне зависимости от режима работы состоят из двух основных частей: неподвижного статора, выполняющего функции якоря и ротора, вращающегося внутри статора и служащего индуктором.

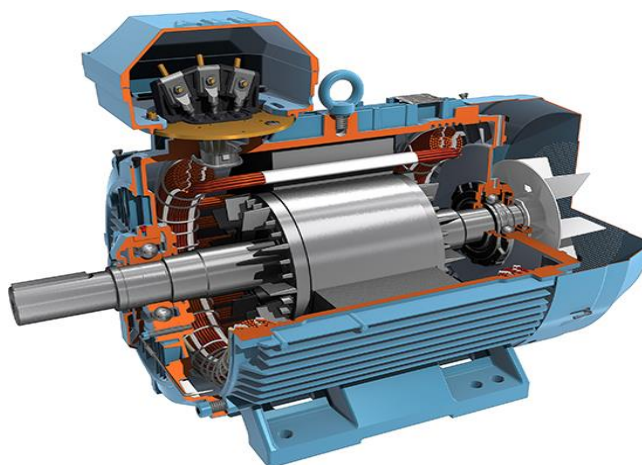


Рисунок 2.1 – Синхронный двигатель с постоянными магнитами

Статор трехфазной синхронной машины аналогичен статору трехфазного асинхронного двигателя. Он состоит из корпуса, цилиндрического сердечника, набранного из отдельных пластин

электротехнической стали, и трехфазной обмотки, уложенной в пазы сердечника.

Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока, который создает магнитное поле, вращающееся вместе с ротором. Ротор имеет обмотку возбуждения, которая через специальные контактные кольца питается постоянным током от выпрямителя или от небольшого генератора постоянного тока, называемого возбудителем. Возбуждение может быть реализовано и посредством постоянных магнитов.

Ротаторы синхронных машин бывают двух типов: с явно выраженными и неявно выраженными полюсами[7].

Ротаторы с явно выраженными полюсами применяются в сравнительно тихоходных машинах (80 – 1000 об/мин), например, гидрогенераторах; они имеют значительное число полюсов. Конструктивно роторы этого типа состоят из вала, ступицы, полюсов, укрепляемых в шлицах ступицы, полюсных катушек возбуждения, размещенных на полюсах. Поверхность полюсного наконечника полюсов имеет такой профиль, что магнитная индукция в воздушном зазоре машины распределяется примерно по синусоидальному закону. Для быстроходных машин (турбогенераторы, синхронные двигатели, турбокомпрессоры и т. п.) явнополюсная конструкция ротора неприменима из-за сравнительно большого диаметра ротора и возникающих в связи с этим недопустимо больших центробежных сил.

Большой механической прочностью обладает ротор с неявно выраженными полюсами. Он состоит из сердечника и обмотки возбуждения. Сердечник изготавливается из стальной поковки цилиндрической формы. На его внешней поверхности фрезеруются пазы, в которые закладывается обмотка возбуждения.

Обмотка возбуждения распределяется в пазах сердечника так, чтобы создаваемое ею магнитное поле было распределено в пространстве по закону, близкому к синусоидальному.

**Принцип действия СД.** Если ротор синхронной машины привести во вращение с некоторой частотой вращения  $n_1$  и возбудить его, то поток возбуждения  $\Phi_{f\delta}$  будет пересекать проводники обмотки статора и в фазах последней будут индуцироваться ЭДС с частотой

$$f_1 = p n_1. \quad (2.1)$$

ЭДС, индуцируемые в обмотках статора, составляют симметричную трехфазную систему ЭДС, и при подключении к обмотке статора симметричной нагрузки эта обмотка нагрузится симметричной системой токов. Машина при этом будет работать в режиме генератора.

При нагрузке обмотка статора создает вращающееся магнитное поле, такое же по характеру, как и поле, создаваемое обмоткой статора асинхронной машины. Это поле статора вращается в направлении ротора с частотой вращения:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}. \quad (2.2)$$

То есть поля статора и ротора вращаются с одинаковой частотой и образуют, таким образом, общее вращающееся поле, как и в асинхронной машине. Поле статора (якоря) оказывает воздействие на поле ротора (индуктора) и называется поэтому также полем реакции якоря [6].

Синхронная машина может работать и в качестве двигателя, если подвести к обмотке ее статора трехфазный ток из сети. В этом случае в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора поле статора увлекает за собой ротор. При этом ротор вращается в ту же сторону и с такой же частотой вращения, как и поле статора. Из формулы (2.2) следует, что чем больше число пар полюсов синхронной машины  $p$ , тем меньше должна быть ее частота вращения для получения заданной частоты  $f_1$ .

Электромагнитный момент  $S$  определяется выражением угловой характеристики:

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi} \cdot E}{\omega_0 \cdot x_{1d}} \cdot \sin(\theta) + \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot \left( \frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \cdot \sin(2 \cdot \theta), \quad (2.3)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети;

$E$  – электродвижущая сила;

$x_{1d}$  – индуктивное сопротивление по поперечной оси двигателя;

$x_{1q}$  – индуктивное сопротивление по продольной оси двигателя;

$\theta$  – угол сдвига между ЭДС статора и напряжения сети.

Из приведенного выражения следует, что максимальный момент двигателя зависит от напряжения и частоты питающей сети и тока возбуждения. Увеличение напряжения сети  $U_1$ , тока  $I_B$  и уменьшение частоты сети  $f_1$  приводит к увеличению максимального момента  $M_{\text{MAX}}$ . На скорость СД влияет только частота сети.

## 2.2. Векторное управление синхронным двигателем.

Наиболее распространенный класс векторно-управляемых электроприводов – это приводы, имеющие в своем составе синхронный двигатель (СД) с постоянными магнитами на роторе. По сравнению с асинхронными двигателями, такие двигатели дороже, но зато имеют меньшие габариты, больший КПД и легче управляются.

Модели векторного управления СД строятся на базе анализа моментного треугольника, который может быть построен:

1. Моментный треугольник может быть образован векторами потокосцеплений ротора  $\overline{\psi}_p$ , статора  $\overline{\psi}_c$  и результирующим (в воздушном зазоре машины)  $\overline{\psi}$ . Угол между векторами  $\overline{\psi}_p$  и  $\overline{\psi}_c$  поддерживается постоянной работой системы управления. Навекторной диаграмме СД (рисунок 2.2) этот угол равен  $90^\circ$ , хотя возможны и другие его значения.

Площадь моментного треугольника увеличивается за счет удлинения вектора  $\bar{\psi}_c$ . Происходит увеличение момента статической нагрузки на валу электропривода, которое вызовет увеличение напряжения и тока статора. Данный векторный треугольник изображен штриховыми линиями. (см. рисунок 2.2)

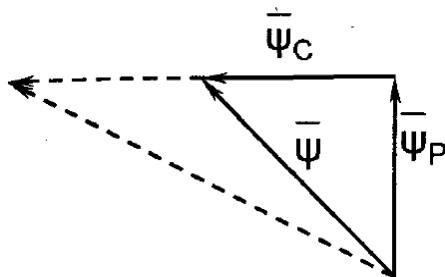


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма синхронного двигателя в частотно-токовой системе регулирования

С ростом момента (и площади треугольника потокосцеплений) увеличивается длина вектора  $\bar{\psi}$ , то есть величина магнитного потока в зазоре и, также, напряжение на якоре.

2. Построить моментный треугольник потокосцеплений в синхронной машине можно и в прямоугольной (декартовой) системе координат. Тогда вектор  $\bar{\psi}_c$  задают (направляют относительно задающего вектора  $\bar{\psi}_p$ ) проекциями его на две ортогональные оси  $d$  и  $q$  машины. Есть разные формы записи выражения для электромагнитного момента синхронного двигателя. Чаще пользуются следующим соотношением:

$$M = 2KS_{\Delta} = K(\psi_d\psi_{Cq} - \psi_q\psi_{Cd}) = 0,5m(\psi_d I_q - \psi_q I_d), \quad (2.4)$$

где  $\psi_d$  и  $\psi_q$  – составляющие вектора полного потокосцепления (в зазоре) по осям  $d$  и  $q$ ;

$\psi_{Cq}$  и  $\psi_{Cd}$  – составляющие по осям  $d$  и  $q$  вектора потокосцепления  $\psi_c$ ;

$I_q$  и  $I_d$  – составляющие тока статора по осям  $d$  и  $q$ .

Знак минус перед вторым слагаемым в скобках получается потому, что составляющие  $\psi_{Cd}$  и  $I_d$  противоположно направлены вектору  $\psi_p$ .



Рассмотрим реализацию построения моментного треугольника по двум сторонами углу между ними. На Рисунке 2.3 Представлена функциональная схема синхронного электропривода с частотнотоковым управлением.

Рассмотрим принцип работы схемы, изображенной на Рисунке 2.3. Подадим на вход МД, неизменный по величине сигнал УРС, когда двигатель преднамеренно заторможен. Тогда ротор 2С неподвижен. Если на вход МД подать постоянное напряжение, то на выходах демодуляторов установятся постоянные напряжения, а пообмоткам фаз статора двигателя будут протекать токи, создающие МДС якоря (статора) машины. С помощью изменения амплитуды и направление магнитодвижущей силы (точнее – пространственное положение максимума, например, положительной полуволны МДС статора вдоль окружности воздушного зазора машины) можно установить нужный нам электромагнитный момент.

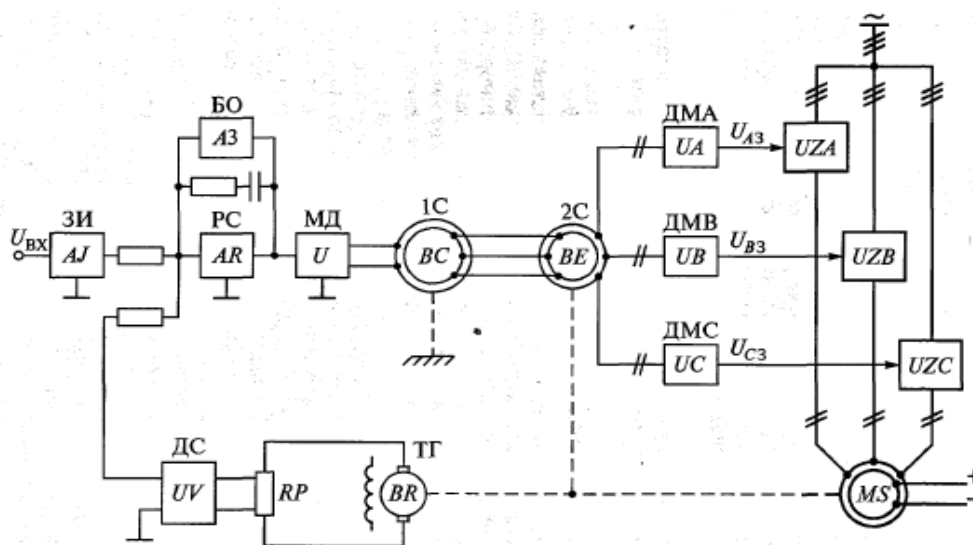


Рисунок 2.3 – Функциональная схема синхронного электропривода с частотнотоковым управлением

Пояснение к схеме:

MS–трехфазный синхронный двигатель;

УЗА, УЗВ, и УЗС – реверсивные управляемые выпрямители;

МД U – модулятор;

1С и 2С (ВСи ВЕ) –сельсины;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ДМА, ДМВ и ДМС (UA, UBи UC) – демодуляторы;

РС – регулятор скорости;

ДС – датчик скорости;

ТГ – тахогенератор;

ЗИ – задатчик интенсивности.

Итак, функционально рассмотренная схема выполнена как двухконтурная схема подчиненного регулирования, в которой функцию внутреннего контура выполняет контур косвенного регулирования электромагнитного момента двигателя (он содержит три параллельных канала регулирования фазных токов статора), а внешним контуром является контур регулирования скорости вращения электропривода с обратной связью по скорости. Регулирование величины электромагнитного момента синхронного двигателя производится за счет изменение амплитуды токов фаз статора пропорционально напряжению на выходе РС при фиксированной величине углаориентации вектора МДС статораотносительно магнитной оси обмотки ротора.

Также рассмотрим принцип работы упрощенной функциональной схемы частотнорегулируемого синхронного электропривода с выделением составляющих тока статора по осям d и q представленной на Рисунке 2.4.

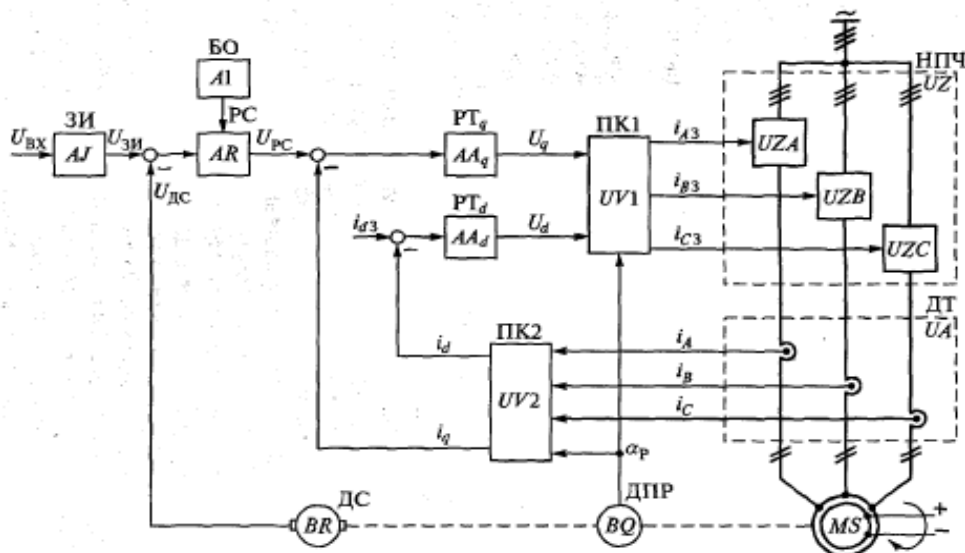


Рисунок 2.4 – Схема функциональная синхронного частотнорегулируемого электропривода с выделением продольной и поперечной составляющих тока статора.

Пояснение к схеме:

MS–синхронный двигатель;

ДТ- датчик тока;

НПЧ – преобразователь частоты с непосредственной связью;

UZA, UZBиUZC–источники тока;

ПК1 (UV1) и ПК2 (UV2)–преобразователи координат 1 и 2 соответственно;

ДПР (BQ) – датчик положения ротора;

РТ<sub>d</sub>и РТ<sub>q</sub> – регуляторы продольной и поперечной составляющих тока статора;

РС – регулятор скорости.

Принцип работы схемы на рисунке 2.4 заключается в следующем. В данной схеме величину тока ротора примем постоянной, а также продольная составляющая тока статора равна нулю. Тогда электромагнитный момент равен:

$$M=0.5m\psi_d I_q. \quad (2.5)$$





электропривода на базе синхронного двигателя. Особенностью данного способа является наличие блока управления моментом и обмотки возбуждения, которая запитывается постоянным напряжением. Кроме того, реализована возможность выбора режима работы электропривода. Остальные блоки структурной схемы идентичны структурной системе прямого управления моментом АД.

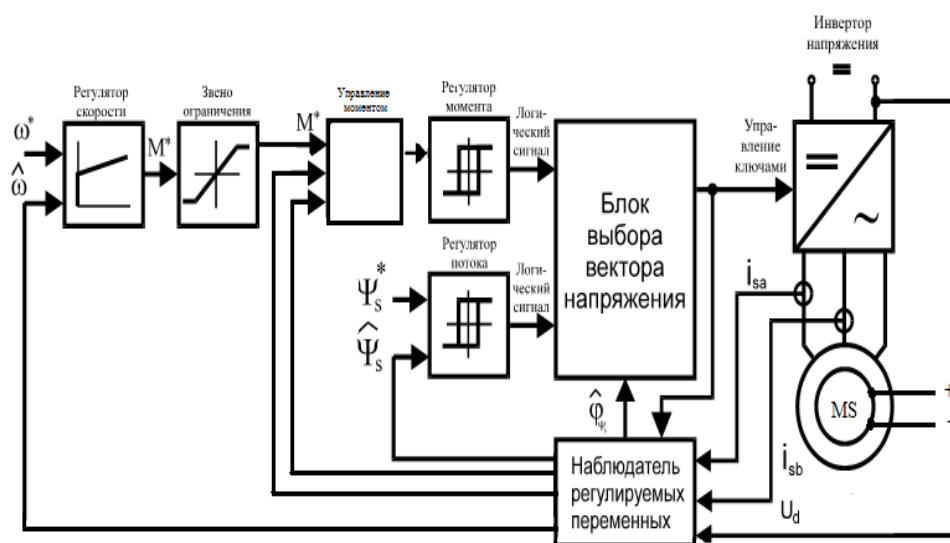


Рисунок 2.6 – Структурная схема прямого управления моментом

#### 2.4. Моделирование ПУМ синхронного двигателя

**Описание модели.** Для оценки быстродействия системы с ПУМ была создана математическая модель в системе Matlab-Simulink (рисунок 2.7). В качестве двигателя была выбрана модель синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Таким образом, электромеханические свойства двигателя в системе d-qкоординат, жестко связаны с обмоткой ротора, записываются следующей системой координат:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \omega_r + r_a i_d \\
 U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \omega_r + r_a i_q \\
 U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Особенностью модели является блок выбора режима работы.

Первый режим работы характеризуется постоянным значением потока по осид, другой режим характеризуется постоянным значением результирующего потока. Достоинством первого режима является большая перегрузочная способность, но низкий  $\cos\phi$ . В другом режиме перегрузочная способность ограничена, но сохраняется хороший  $\cos\phi$ .

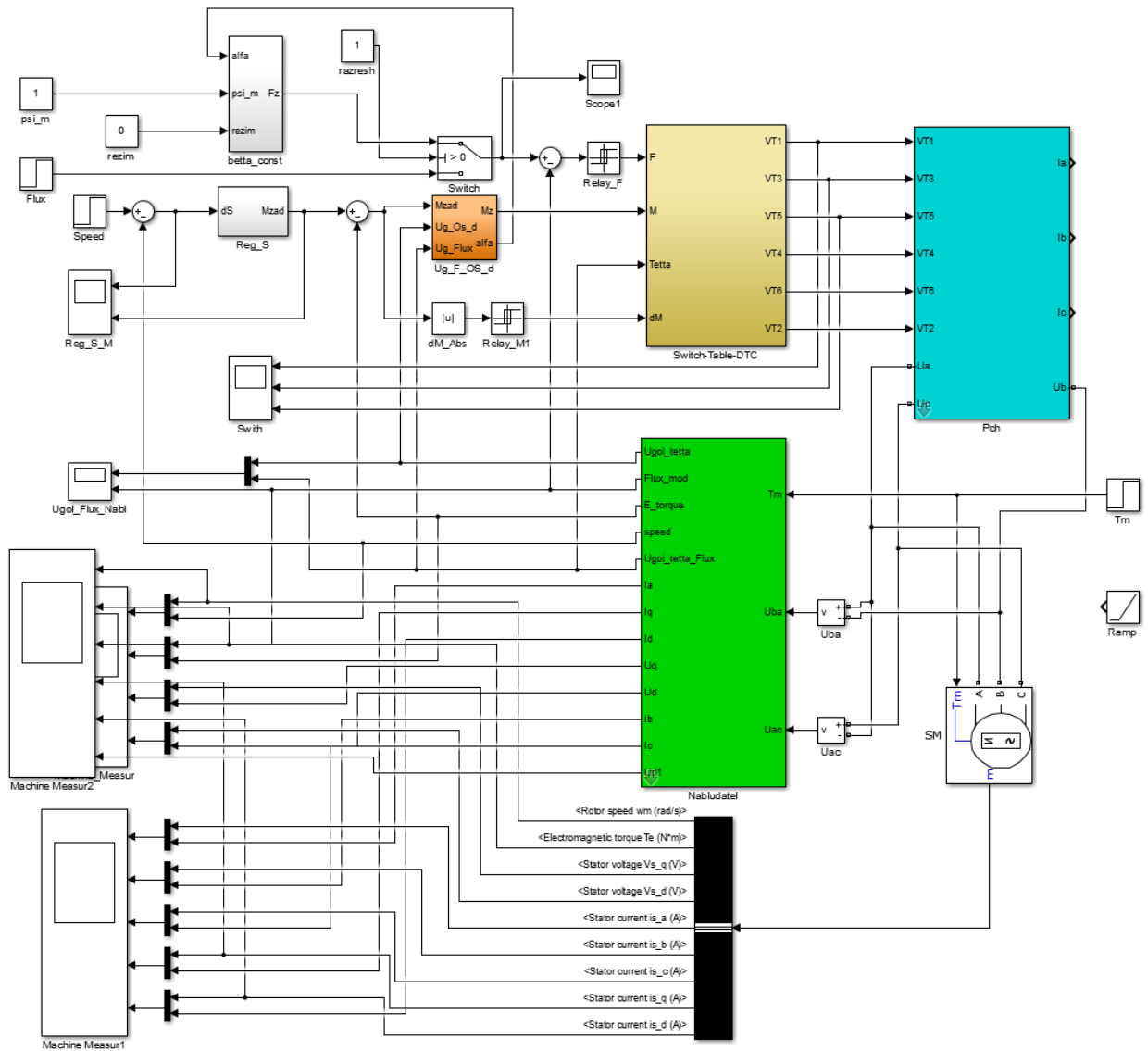


Рисунок 2.7 – Модель ПУМ синхронного электропривода

**Результаты моделирования.** Результаты моделирования для синхронного двигателя с параметрами в таблице 2.1 представлены на рисунке 2.8 и рисунке 2.9. В первом режиме (рисунок 2.8) угол между векторами потокоцепления ротора и статора прямой. Это обеспечивает максимальный момент при минимальных токах статора и ротора.



Таблица 2.1 – Параметры синхронного двигателя

Номер	Параметр	Размерность	Значение
1	Мощность	кВт	15
2	Номинальное линейное напряжение	В	400
3	Номинальная частота	Гц	50
4	Активное сопротивление статора	Ом	0,215
5	Индуктивность по продольной оси d	Гн	0,065
6	Индуктивность по поперечной оси q	Гн	0,065
7	Момент инерции	кг*м <sup>2</sup>	0,102
8	Число пар полюсов	-	2
9	Номинальная скорость	об/мин	1460
10	Номинальный момент	Нм	98

На первом временном отрезке происходит разгон до заданной скорости в 100 р/с. В момент времени 0,25 с происходит ослабление поля в два раза. В момент времени 0,5с происходит наброс нагрузки в 150Нм. Система показывает быстрое нарастание момента и небольшую ошибку регулирования скорости.

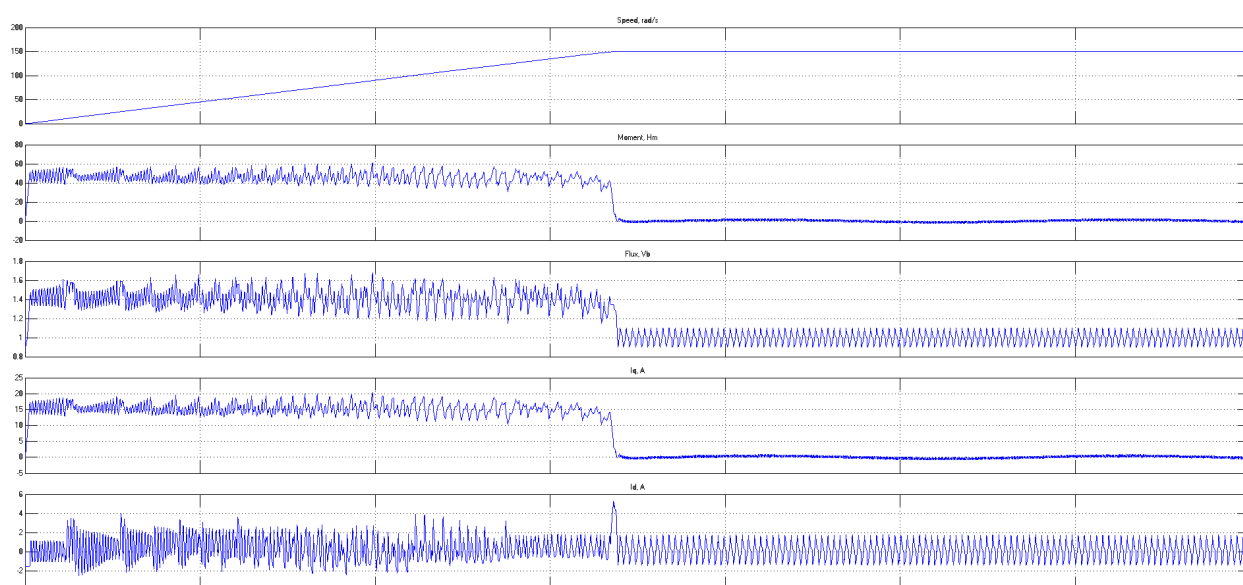


Рисунок 2.8 – Результаты моделирования

Во втором режиме поддерживается постоянным угол между токами и напряжениями статора, т.е.  $\cos\varphi=1$ . В таком режиме при тех же токах получается меньший момент и увеличивается время разгона.

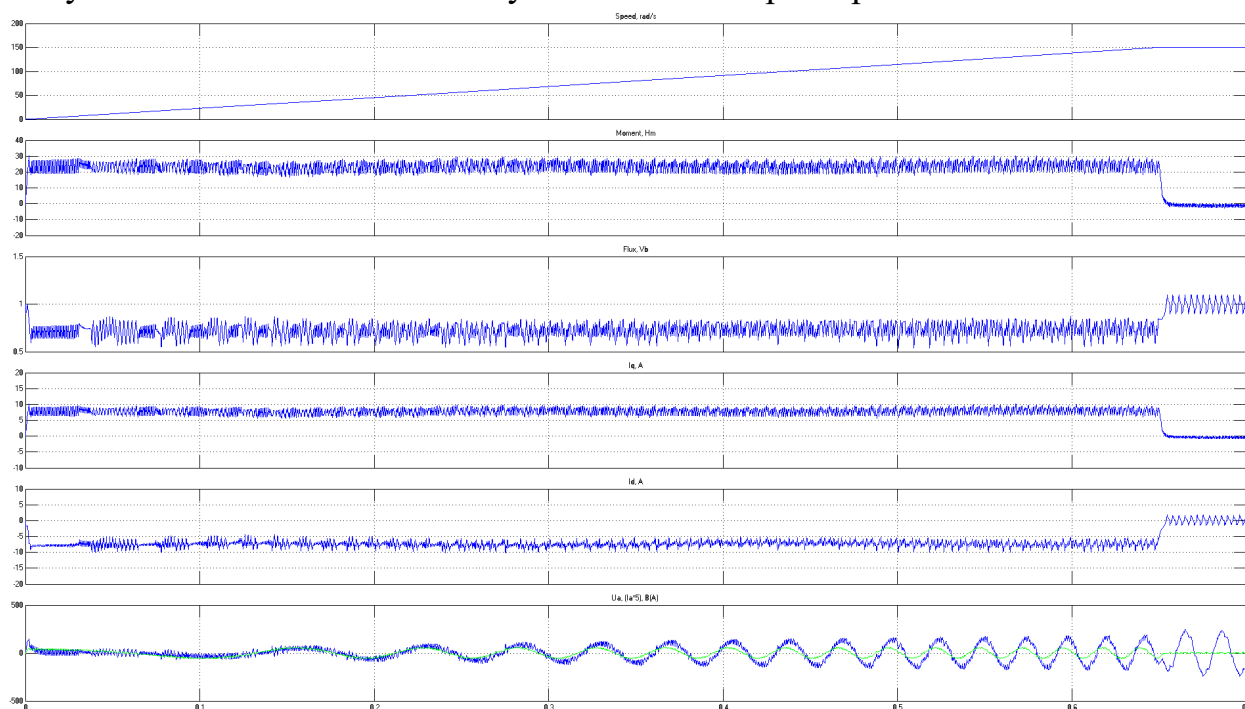


Рисунок 2.9 – Результаты моделирования  $\cos\varphi = 1$

## 2.5. Выводы

1. Прямое управление моментом является векторным способом регулирования скорости синхронного двигателя, позволяющем получать хорошую динамику электромагнитных процессов преобразования энергии. Алгоритмы работы такой системы позволяют реализовать различные режимы работы: максимальный момент при минимальных токах статора и ротора, поддержание постоянного значения  $\cos\varphi$ ;

2. Результаты моделирования подтверждают теоретические предпосылки хорошей динамики системы электропривода с прямым управлением моментом, а также показывают возможность реализации различных режимов работы синхронного электропривода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование систем прямого управления моментом, путем их моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Прямое управление моментом является векторным способом регулирования скорости асинхронного двигателя, позволяющем получать хорошую динамику электромагнитных процессов преобразования энергии. Такая система может обходиться без датчиков скорости и не чувствительна к изменению параметров машины, например, активного сопротивления;

2. Результаты моделирования подтверждают теоретические предпосылки хорошей динамики системы электропривода с прямым управлением моментом.

3. Прямое управление моментом является векторным способом регулирования скорости синхронного двигателя, позволяющем получать хорошую динамику электромагнитных процессов преобразования энергии. Алгоритмы работы такой системы позволяют реализовать различные режимы работы: максимальный момент при минимальных токах статора и ротора, поддержание постоянного значения  $\cos\phi$ ;

4. Результаты моделирования подтверждают теоретические предпосылки хорошей динамики системы электропривода с прямым управлением моментом, а также показывают возможность реализации различных режимов работы синхронного электропривода.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		45

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Барац, Е.И. Разработка и исследование усовершенствованных структур электроприводанаоснове систем «преобразователь частоты – асинхронных двигатель» при различных способах управления.: дис. канд. тех. наук / Е.И. Барац. – Е., 2000. – 251 с.
- 2 Вольдек, А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек.- СПб: Изд-во Питер, 2010.-349 с.
- 3 Драчев, Г.И. Теория Электропривода: Учебное пособие / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. - Ч.1.– 209с.
- 4 Драчев, Г.И. Теория Электропривода : Учебное пособие / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. –Ч.2. - 193с.
- 5 Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учебное пособие / Ю.С. Усынин. – 2-е изд. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328.
- 6 Иванова-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник. В 2 т. / А.В. Иванова-Смоленский. – 3-е изд.- Москва: Изд-во МЭИ, 2006. – 532.
- 7 Калачев, Ю.Н. Векторное регулирование: методическое пособие / Ю.Н. Калачев. – Москва: Изд-во ЭФО, 2013. – 72.
- 8 Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебное пособие / И.П. Копылов. – 3-е изд. - Москва: Изд-во Высш. шк., 2001. – 327.
- 9 Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник / И.П. Копылов. – 4-е изд. – Москва: Изд-во ЮРАЙТ, 2011. – 767.
- 10 Blaabjerg, F. SingleCurrentSensorTechiqueintheDCLinkofThree-PhasePWM-VSInverters: AReviewandaNovelSolution / F.Blaabjerg, J.K.Pedersen, U.Jaeger, P.Thoegersen // IEEETransactionOnIndustryApplication. Vol. 33, No. 5, September/October 1997.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46

11 Hofmann H.,

Sanders S.R.

Speed Sensorless Vector Torque Control of Induction Machines Using a Two-Time-Scale Approach // IEEE Transaction On Industry Application. Vol. 34, No. 1, January/February 1998.

12 Masure, K. High-Response Flux Control of Direct-Field-

Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account /

K. Matsuse, T. Yoshizumi, S. Katsuta, S. Taniguchi //

IEEE Transaction On Industry Application. Vol. 35, No. 1, January /February 1999.

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.028.01ПЗ				