

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа, состоящая из 90 страниц, 27 рисунков, 24 таблиц, 14 источников.

Ключевые слова:

ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, ПИТАТЕЛЬ СЫРОГО УГЛЯ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ, ТОК, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Целью данной работы являлась разработка электрического привода на основе системы “преобразователь частоты – асинхронный двигатель”.

В процессе исследования проводилось описание функциональной и принципиальной схем, а также принципа работы электропривода. Приведено технико-экономическое обоснование, принципиальная схема и принцип действия системы, расчет мощности двигателя и выбор его по каталогу, построение естественных и искусственных механических характеристик двигателя, семейство механических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, схема управления, цикл работы механизма. Курсовая работа выполнена на белых листах формата А4 в текстовом редакторе Microsoft Word. Для моделирования системы использованы программы MatLab Simulink, Mathcad.

Оглавление

Введение.....	3
1. Обзор литературы	5
2. Обоснование применения частотного управления асинхронным двигателем в приводе питателя сырого угля	6
2.1 Преимущества и недостатки асинхронного электропривода	6
2.2 Особенности выбора частотно-регулируемого привода.....	7
3. Расчет электропривода шнекового питателя сырого угля	12
3.1 Выбор двигателя для шнекового питателя сырого угля	12
3.2 Механическая система электропривода и ее параметры.....	16
3.3 Определение параметров схемы замещения	16
3.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя	18
3.5 Расчет искусственных механических и электромеханических характеристик системы регулируемого электропривода для заданного диапазона регулирования скорости.....	22
3.6 Выбор преобразователя частоты.....	26
4. Имитационное моделирование асинхронного электропривода шнекового питателя сырого угля со скалярным управлением	28
4.1 Моделирование прямого пуска асинхронного двигателя.....	28
4.2 Моделирование прямого пуска электродвигателя с частотным законом управления $U/f=\text{const}$	31
4.3 Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением.....	35
Заключение.....	40
Список литературы.....	41

Введение

Одними из ключевых направлений развития промышленности, на сегодняшний день, являются: автоматизация производства, энергоэффективность и экономичность. Все они тесно связаны и вытекают друг из друга. Так автоматизация и модернизация технологических процессов проводится для эффективного расходования энергии и улучшения условий труда, что в свою очередь приводит к уменьшению экономических издержек. Тепловые электростанции так же не остаются в стороне и придерживаются этих тенденций. Основными способами экономии на ТЭС являются уменьшение потребления энергии на собственные нужды и повышение надежности основных узлов и агрегатов, ведь любая поломка, приводящая к остановке турбогенератора, несет за собой многомиллионные убытки. Таким образом модернизация электроприводов топливоподачи, пылеприготовления, насосов и тягодутьевых механизмов является первоочередной целью развития ТЭС.

Питатели сырого угля являются важным элементом системы топливоподачи, поэтому их привод должен соответствовать современным требованиям.

Рабочая скорость вращения вала двигателей меняется в относительно небольшом диапазоне регулирования: от 500 до 1900 об/мин. В зависимости от нужной производительности котлоагрегата механизм может работать на всех скоростях данного диапазона длительное время. По отношению к электроприводу шнековый питатель рассматривается как нагрузка, у которой статический момент не зависит от скорости. Длительный режим работы, с редкими пусками и остановками. Исходя из этого, отсутствуют жесткие требования к динамике электропривода и ограничения по характеру переходных процессов во время пуска, торможения и перехода с одной скорости на другую. Однако возможны кратковременные скачкообразные «набросы» нагрузки, сопровождаемые сильным возрастанием статического момента, что может привести к заклиниванию исполнительного механизма. Так

же важно помнить, что электрические двигатели эксплуатируются в насыщенной угольной пылью окружающей среде[1].

На данный момент большинство котельных агрегатов имеет в распоряжении исполнительные механизмы питателей сырого угля приводимые в движение регулируемым электроприводом постоянного тока. Замена таких электроприводов на систему «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» приведет к снижению эксплуатационных расходов по обслуживанию системы и возможности интеграции в современную систему управления, что соответствует целям модернизации.

1 Обзор литературы

В последнее десятилетие в мире наблюдается широкое применение преобразователей частоты двигателей, устройств плавного пуска (софт-стартеров) для решения различных технологических задач во всех отраслях промышленности.

Преобразователем частоты называют устройство, состоящее из выпрямителя, который преобразует переменный ток промышленной частоты в постоянный, и инвертора, который в свою очередь преобразует постоянный ток в переменный, с необходимой частотой и амплитудой.

Скалярное управление позволяет формировать гармонические токи фаз двигателя. Векторное управление дает возможность управлять, не только формированием гармонических токов (напряжений) фаз, но магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя).

Использованию системы ПЧ-АД сопутствует значительный экономический эффект от внедрения частотных преобразователей, который достигается благодаря следующим факторам:

- экономии электроэнергии в насосных, вентиляторных и компрессорных агрегатах до 50% - 60% благодаря регулированию производительности с помощью регулирования частоты вращения двигателя в отличие от регулирования способом включения/отключения и т.п.;
- повышения качества продукции;
- увеличения объема выпускаемой продукции и производительности производственного оборудования;
- увеличения срока службы технологического оборудования путем улучшения динамики работы электропривода.

2 Обоснование применения частотного управления асинхронным двигателем в приводе питателя сырого угля

2.1 Преимущества и недостатки асинхронного электропривода

При принятии решения о переходе к асинхронному электроприводу ПСУ важно правильно оценить затраты и соизмерить их с достигаемым эффектом. К самым важным экономическим предпосылкам перехода к асинхронному электроприводу для рассматриваемого объекта автоматизации относятся:

- Низкая стоимость. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет более низкую стоимость по сравнению с двигателем постоянного тока. Причиной этому служит более простая конструкция и высокая технологичность производства. Асинхронные двигатели имеют более широкое распространение, чем остальные виды электрических машин.

- Малые эксплуатационные затраты. Асинхронный двигатель практически не нуждается в обслуживании в течении всего времени эксплуатации, а двигатель постоянного тока требует регулярного обслуживания коллекторного узла.

- Ремонт электрической машины. Общие затраты на организацию и проведение ремонта машин постоянного тока часто равна или даже превышает стоимость нового асинхронного двигателя.

- Степень защиты. Исполнения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором имеют широкий ряд степеней защиты. Это крайне важно для рассматриваемой задачи (в окружающей среде содержится высокая концентрация угольной пыли). Производство коллекторной машины на высокую степень защиты приводит к ее существенному удорожанию и осложняет обслуживание. В некоторых случаях можно создать локальные условия установки с более благоприятной окружающей средой, но это приводит к еще большим затратам[2].

Перечисленные факторы касаются только двигателей. Системы управления в данном случае не рассматриваются. Это сравнение будет некорректным в отношении к используемым преобразователям привода постоянного тока. Эти приводы на действующих питателях сырого угля зачастую не только морально устарели, но и отработали свой ресурс. Данный факт приводит к затратам на сохранение их работоспособности, уменьшению надежности технологического процесса и лишает возможности включения их в современную систему управления без серьезных дополнительных усилий.

Данные преимущества асинхронных двигателей не учитывают того, что он будет работать вместе с преобразователем частоты. Незнание некоторых особенностей работы такой системы способно привести к нерациональному использованию привода или даже к неправильному его выбору. Ключевыми из них будут те, которые отвечают за оптимальность энергетических показателей и адекватный выбор привода по мощности.

1) При работе асинхронных двигателей от преобразователей частоты их КПД снижается на 2 ... 3%, а $\cos\varphi$ до 5%.

2) Добавочные высокочастотные потери, которые вызывает не синусоидальность напряжения, приводят к нагреву двигателя и снижению полезной мощности на его валу (до 25%).

При использовании системы асинхронный двигатель - преобразователь частоты, принимаются меры по улучшению гармонического состава (устанавливаются дополнительные устройства, корректирующие параметры настройки преобразователя и т.п.).

2.2 Особенности выбора частотно-регулируемого привода

Выбор частотно-регулируемого привода для питателя сырого угля имеет некоторые особенности. Перечислим самые характерные для данного типа механизмов.

Небольшой диапазон скоростей приводов питателей можно достичь относительно несложным и наиболее широко распространенным методом управления: вольт/частотным. Диапазон регулирования современных

электроприводов с асинхронным двигателем при вольт/частотном управлении может составлять 1:40, что для питателя сырого угля более чем достаточно. Кроме этого, вольт/частотное управление при соблюдении закона $U/f = \text{const}$ позволяет обеспечить постоянство критического момента, необходимое для данного типа нагрузки. Однако границы диапазона скоростей (нижняя - 500 об/мин и верхняя - 1900 об/мин) являются несколько "неудобными" для стандартного ряда скоростей асинхронных двигателей.

Самыми удобными для применения в данных условиях являются асинхронные двигатели с синхронными скоростями 1500 и 3000 об/мин.

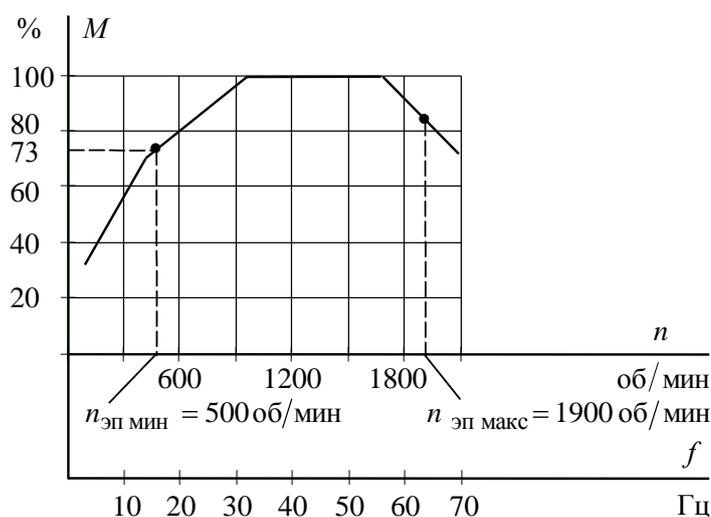


Рисунок 1 – Зависимость $M(n)$ для электродвигателя с $n_0 = 1500$ об/мин

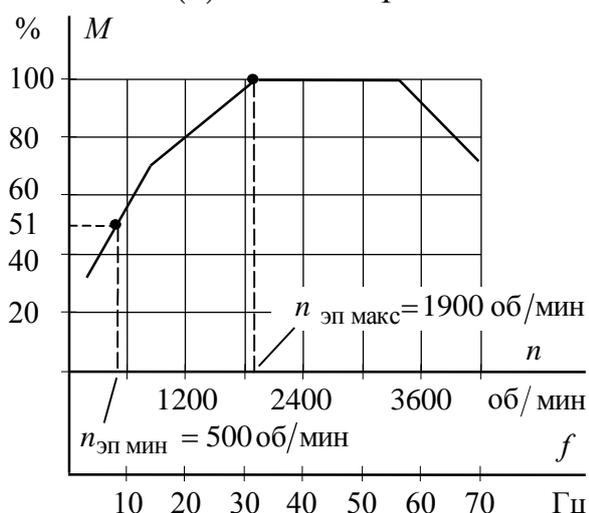


Рисунок 2 – Зависимость $M(n)$ для электродвигателя с $n_0 = 3000$ об/мин

Первый двигатель (1500 об/мин) на верхней границе диапазона будет работать с серьезным превышением частоты тока статора (по отношению к номинальной), а второй (3000 об/мин) с еще более значительным снижением, но

уже у нижней границы диапазона. В обоих случаях необходимо создание запаса по моменту. В первом случае потому, что увеличивая частоту и оставляя постоянным первичное напряжение, произойдет уменьшение магнитного потока, а, следовательно, и максимального момента двигателя. Но одновременно с этим отвод тепла у самовентилируемого двигателя окажется эффективнее, а КПД и $\cos\phi$ изменятся незначительно.

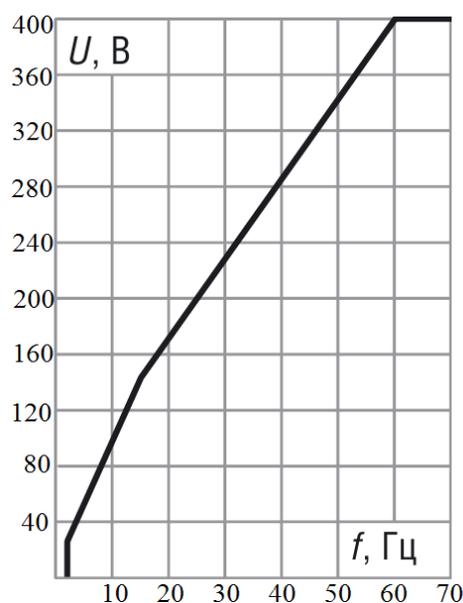


Рисунок 3 – Вольт-частотная характеристика

Функция компенсации момента дает возможность увеличения выходного момента при старте и работе двигателя на малых скоростях. При ее выполнении корректируется выходное напряжение инвертора в соответствии с устанавливаемым коэффициентом компенсации. При выборе преобразователя частоты для таких электроприводов необходимо акцентировать внимание на следующих характеристиках (наиболее критичные для ПСУ):

- высокая перегрузочная способность;
- хорошо организованная система защит и предупреждений;
- возможность настройки вольт/частотной характеристики.

Другие характеристики не так критичны.

С технологической точки зрения достигаются следующие преимущества:

1. Независимое управление каждым из трех питателей котла дает возможность организовать регулирование нагрузки котла без скачков.

2. Относительно простая интеграция современных преобразователей частоты в любые системы управления, как низовой интеллектуальный элемент автоматики, не нуждаются в сложных согласующих схемах.

3 Расчет электропривода шнекового питателя сырого угля

3.1 Выбор двигателя для шнекового питателя сырого угля

3.1.1 ШПСУ котельного агрегата

Шнек (винтовой конвейер) – механизм состоящий из винта, вращающегося внутри закрытого желоба (рис.4).

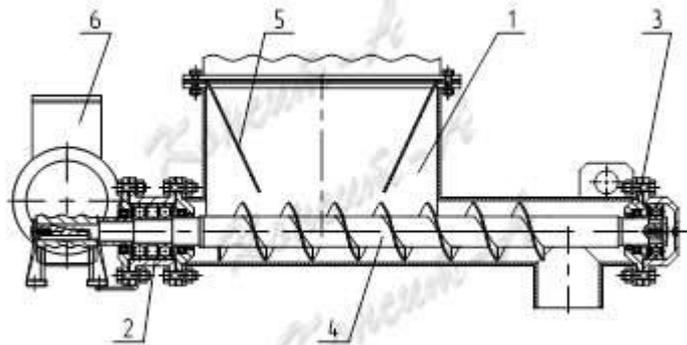


Рисунок 4 - Шнековый конвейер: 1 - корпус; 2,3 - опоры; 4 - винт; 5 - отбойник; 6 – двигатель-редуктор.

Лопастни винта при вращении захватывают поступающее в желоб топливо и продвигают его вдоль желоба, имеющего внизу полуцилиндрическую форму. Перемещение топлива происходит по принципу передвижения гайки вдоль вращающегося винта. В данном случае гайкой является топливо, удерживаемое от совместного вращения с винтом собственным весом и силой трения о стенки желоба [3].

Топливо поступает в желоб шнека через верхний патрубок, а выходит через нижний, размещенный на дне желоба. Патрубки имеют затворы (задвижки).

Шнеки устанавливают как горизонтально, так и под углом до 20° к горизонту, по длине выполняют до 30-40 м. с максимальной производительностью 100 т/ч угля.

3.1.2 Выбор двигателя

В таблицах 1,2 приведены некоторые параметры шнека и редуктора задействованных в системе топливоподачи на Томь-Усинской ГРЭС.

Таблица 1 – Параметры шнека

Диаметр винта шнека D, м	Длина желоба L, м
0,4	10

Таблица 2 – Параметры редуктора

Тип редуктора	КПД η	Передаточное число i
КЦ2-750	0,91	28

Выбор двигателя осуществляется по методике, представленной в работе М. Д. Картошкина [3, с. 88-90].

Часовая производительность шнека зависит от площади поперечного сечения движущегося топлива и скорости перемещения топлива вдоль шнека. Число оборотов в минуту принимается в зависимости от диаметра ШПСУ (табл 4-47[3,с.89]) и равно $n=71$ об/мин.

$$Q = 3600 \cdot \frac{\pi D^2}{4 \cdot 60} \cdot n \cdot S \cdot \varphi = 3600 \cdot \frac{\pi 0,4^2}{4 \cdot 60} \cdot 71 \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 64,239 \text{ м/ч}$$

где φ - коэффициент заполнения принимают в пределах 0,3-0,4. Значение 0,3 принимаем для перемещения мелкого угля, а 0,4 для угольной пыли. В нашем случае $\varphi=0,3$;

S - шаг винта, который принимают равным диаметру винта: $S=D=0,4\text{м}$

Мощность на валу винта шнека расходуется на преодоление следующих сопротивлений: перемещению топлива и трения его о желоб и винт; трения в промежуточных и концевых подшипниках; сопротивления промежуточных подшипников прохождению топлива; от перемешивания и размельчения топлива. Большая часть указанных вредных сопротивлений не поддается точному подсчету, поэтому потребную мощность N_0 определяют по эмпирической формуле, в которой все потери на преодоление сопротивлений учтены общим опытным коэффициентом ξ :

$$N_0 = \frac{Q}{367} \cdot L \cdot (\xi + \sin \beta) = \frac{64,239}{367} \cdot 10 \cdot (4 + \sin 0) = 7,002 \text{ кВт}$$

Коэффициент ξ зависит от физических свойств топлива. Для кузнецкого угля $\xi=4$. Угол β – угол наклона шнека к горизонту, в нашем случае $\beta=0$.

Мощность электродвигателя

$$P = (1,2 - 1,25) \frac{N_0}{\eta} = 1,2 \frac{7,002}{0,91} = 9,233 \text{ кВт}$$

где η -КПД редуктора; 1,2-1,25 – коэффициент запаса мощности на трогание с места и прочие неучтенные потери.

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АИР160S6, параметры которого приведены в таблице 3[4].

Таблица 3. Технические данные электродвигателя АИР132М4

Р, кВт	n_0 , об/мин	При номинальной нагрузке			Степень защиты	Климатическое исполнение
		η	$\cos\varphi$	$S_n, \%$		
11	1500	87,5	0,87	3,5	IP44	УХЛ3

$m_n = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n}$	$m_m = \frac{M_{\text{мин}}}{M_n}$	$m_k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$	$k_{i \text{ дв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_n}$	$J_{\text{дв}}, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$
-------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	--	---

2.0	1.6	2.7	7.5	0,04
-----	-----	-----	-----	------

3.1.3 Расчетные параметры двигателя

Для построения естественных электромеханических и механических характеристик, необходимо определить дополнительные параметры двигателя и параметры Т-образной схемы замещения.

Синхронная частота

$$\omega_0 = \pi \cdot \frac{n_0}{30} = 3.14 \cdot \frac{1500}{30} = 157,068 \text{ рад/с.}$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{ДВ.Н} = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0.035) \cdot 1500 = 1447 \text{ об/мин.}$$

$$\omega_{ДВ.Н} = \pi \cdot \frac{n_{ДВ.Н}}{30} = 3.14 \cdot \frac{1447}{30} = 151,518 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{ДВ.Н} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_{ДВ.Н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{151,518} = 72,6 \text{ Н·м.}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{1Н} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1Н} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,875} = 25,397 \text{ А.}$$

3.2 Механическая система электропривода и ее параметры

Расчётная эквивалентная схема замещения приведена на рисунке 4.

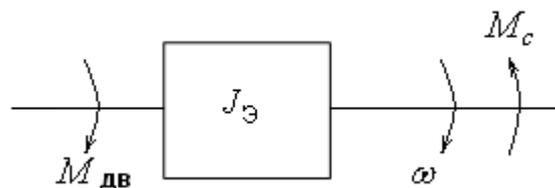


Рисунок 4 – Расчётная схема механической системы привода

В схеме представленной на рисунке 4 приняты следующие обозначения:

$M_{дв}$ - вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя, Н·м;

M_C - момент нагрузки, с учетом потерь в механизме, приведенный к валу двигателя, Н·м;

ω - угловая скорость, рад/с;

J_3 - эквивалентный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, кг·м.

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\Sigma} = J_{ДВ} + 0,5 \cdot J_{ДВ} = 0,04 + 0,02 = 0,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Момент инерции механизма взят как половина момента инерции двигателя.

Момент статической нагрузки равен:

$$M_C = \frac{P_{с.макс}}{\omega_{р.макс}} = \frac{9223}{198,95} = 46,6 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где
$$\omega_{р.макс} = \frac{\pi \cdot n_{макс}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1900}{30} = 198,95 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

3.3 Определение параметров схемы замещения

Ток холостого хода асинхронного двигателя находится по следующему выражению:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}},$$

где $S_{ном} = 0,033$ - номинальное скольжение (из паспортных данных);

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,875} = 25,397 \text{ А} - \text{номинальный ток статора}$$

двигателя;

$$I_{11} = \frac{P_{жс} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \phi_{ржс} \cdot \eta_{ржс}} = \frac{0,84 \cdot 11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,731 \cdot 0,875} = 21,899 \text{ А} - \text{ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;

Коэффициент загрузки двигателя:

$$p_* = \frac{P}{P_H} = \frac{9233}{11000} = 0,84$$

Коэффициент мощности и КПД при частичной нагрузке редко приводятся в технической литературе, а для определенного ряда серий электрических машин эти данные в справочной литературе и вовсе отсутствуют. Данные параметры определяются, исходя из следующих соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что максимальный КПД достигается при загрузке на 10-15% меньше номинальной. Делается это так потому, что большинство из двигателей по причине стандартной дискретной шкалы мощностей работают с определенной недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке $p_* = 0,84$ практически равны между собой, т.е.

$$\eta_n \approx \eta_{0,75}$$

- коэффициент мощности при той же нагрузке $p_* = 0,84$ в значительной мере отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в сильно зависит от мощности двигателя и для известных серий АД с достаточной для практически точностью подчиняется зависимости, приведенной в источнике [5, с.16, на рис. 4.6.]

$$\cos \varphi_{0,84} = 0,974 \cdot \cos \varphi_H = 0,974 \cdot 0,75 = 0,731$$

$\cos \varphi_{0,84} = 0,731$ - коэффициент мощности при частичной нагрузке;

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{21,899^2 - [0,84 \cdot 25,397 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,84 \cdot 0,035)]^2}{1 - [0,84 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,84 \cdot 0,035)]^2}} = 9,904 \text{ A}$$

Из формулы Клосса определяется соотношение, которое необходимо для определения критического скольжения:

$$s_k = s_H \frac{k_{МАКС} + \sqrt{(k_{МАКС})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{МАКС} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{МАКС} - 1)} =$$

$$= 0,035 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,208$$

где $\beta = \frac{R_1}{C_1 \cdot R_2}$ - значение коэффициента β находится в диапазоне

0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем $\beta = 1$; $k_{МАКС} = 2,5$

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} \right) = 1 + \frac{9,904}{2 \cdot 7,5 \cdot 25,397} = 1,026 ;$$

где $k_i = 7,5$.

T-образная схема замещения двигателя для одной фазы представлена на рисунке 5.

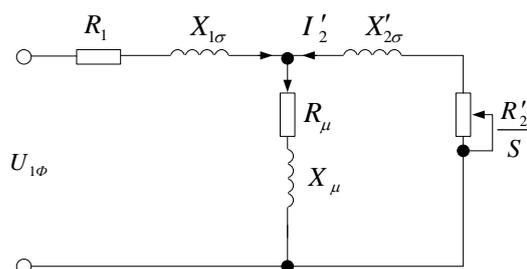


Рисунок 5 – Схема замещения асинхронного двигателя

Коэффициент:

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{MAX} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0,033)}{2 \cdot 1,026 \cdot 2,5 \cdot 11000} = 2,299.$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_k) C_1} = \frac{2,299}{\left(1 + \frac{1}{0,208}\right) \cdot 1,026} = 0,386 \text{ Ом};$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1,026 \cdot 0,386 \cdot 1 = 0,396 \text{ Ом}$$

Определение параметра γ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,208^2}\right) - 1^2} = 4,706.$$

Тогда

$$X_{KH} = \gamma C_1 R_2' = 4,706 \cdot 1,026 \cdot 0,386 = 1,862 \text{ Ом},$$

Для выделения сопротивления рассеяния фаз статора и ротора из индуктивного сопротивления X_{KH} , необходимо использовать соотношения, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано

$$X_{2H}' = \frac{0,58 X_{KH}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 1,862}{1,026} = 1,053 \text{ Ом},$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению

$$X_{1H} = 0,42 X_{KH} = 0,42 \cdot 1,862 = 0,782 \text{ Ом},$$

По найденным значениям переменных C_1 , R_2' , R_1 и X_{KH} будет определено критическое скольжение

$$s_K = \frac{C_1 R_2'}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,026 \cdot 0,386}{\sqrt{0,396^2 + 1,862^2}} = 0,208.$$

Исходя из векторной диаграммы ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cos \phi_{1H} - R_1 I_{1H})^2 + (U_{1H} \sin \phi_{1H} + X_{1H} I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,75 - 0,396 \cdot 25,397)^2 + (220 \cdot 0,661 - 0,782 \cdot 25,397)^2} = 199,498 \text{ В} \end{aligned}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{199,498}{9,904} = 20,142 \text{ Ом}.$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,782}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,49 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,053}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu H} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{20,142}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,064 \text{ Гн}.$$

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры схемы замещения электродвигателя

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, Гн	X_{KH} , Ом
0,396	0,782	$2,49 \cdot 10^{-3}$	20,142	0,064	0,386	1,053	$3,35 \cdot 10^{-3}$	1,862

Используя параметры схемы замещения, будет произведен расчет механических и электромеханических характеристик.

3.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя

Электромеханическая характеристика при частотном управлении АД, определяется зависимостью приведенного тока ротора от скольжения

$$I'_2(s) = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R'_2}{s X_{\mu H} f_{1*}}\right)^2}},$$

где U_{1j} - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}}$ - относительное значение частоты питающего напряжения.

Задаваясь значениями скольжения можно рассчитать соответствующее значение тока и воспользовавшись формулой, $\omega = \omega_0(1-s)$ получим соответствующее значение угловой скорости[5].

Если предположить, что ток намагничивания двигателя имеет полностью реактивный характер, тогда выражение для электромеханической характеристики, описывающей зависимость тока статора от скольжения, примет следующий вид

$$I_{1j}(s) = \sqrt{I_0^2 + I_{2j}'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2j}'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

Так как с изменением частоты f_{1j} и напряжения статора U_{1j} ток холостого хода I_0 изменяется, то его значение для каждой из частот будем определять по выражению

$$I_{0j} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1H} + X_{\mu H})^2 \cdot f_{1*}^2}},$$

Величина $\sin \varphi_2(s)$ из выражения (2):

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}.$$

Таблица 5. Значения электромеханической характеристики

ω , рад/с	0	106,107	151,582	157,08
$I_1(\omega)$	190,476	126,984	25,397	9,904

Естественная электромеханическая характеристика двигателя представлена на рисунке 6.

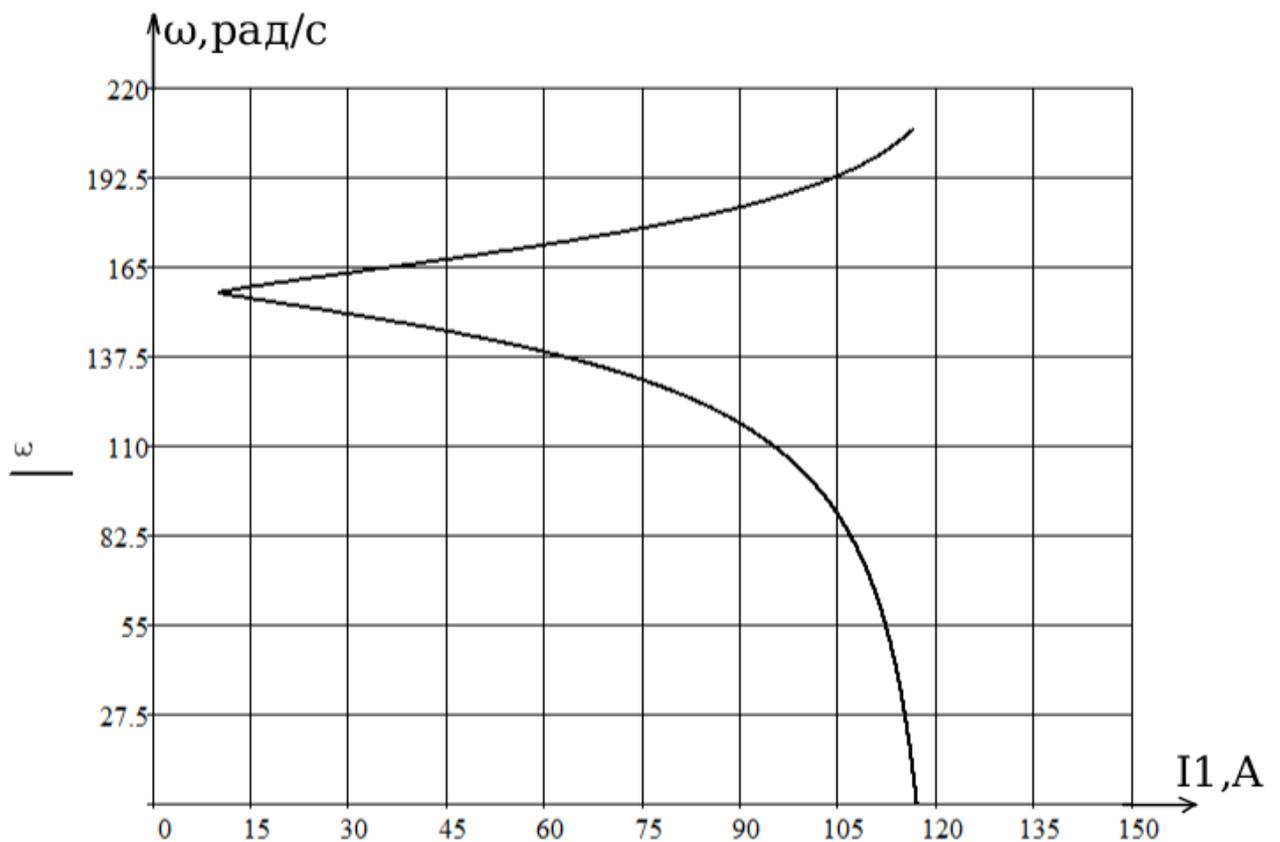


Рисунок 6 – Естественные электромеханические характеристики АД
 Механическую характеристику асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания можно рассчитать по следующему выражению

$$M(s) = \frac{3U_{1j}^2 R_2'}{\omega_{0j} s_j \left[X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 \right]}$$

Таблица 6. Значения механической характеристики

ω, рад/с	0	41,477	82,955	124,432
M(S)	145,136	116,109	145,136	195,934

Естественная механическая характеристика двигателя представлена на рисунке 7.

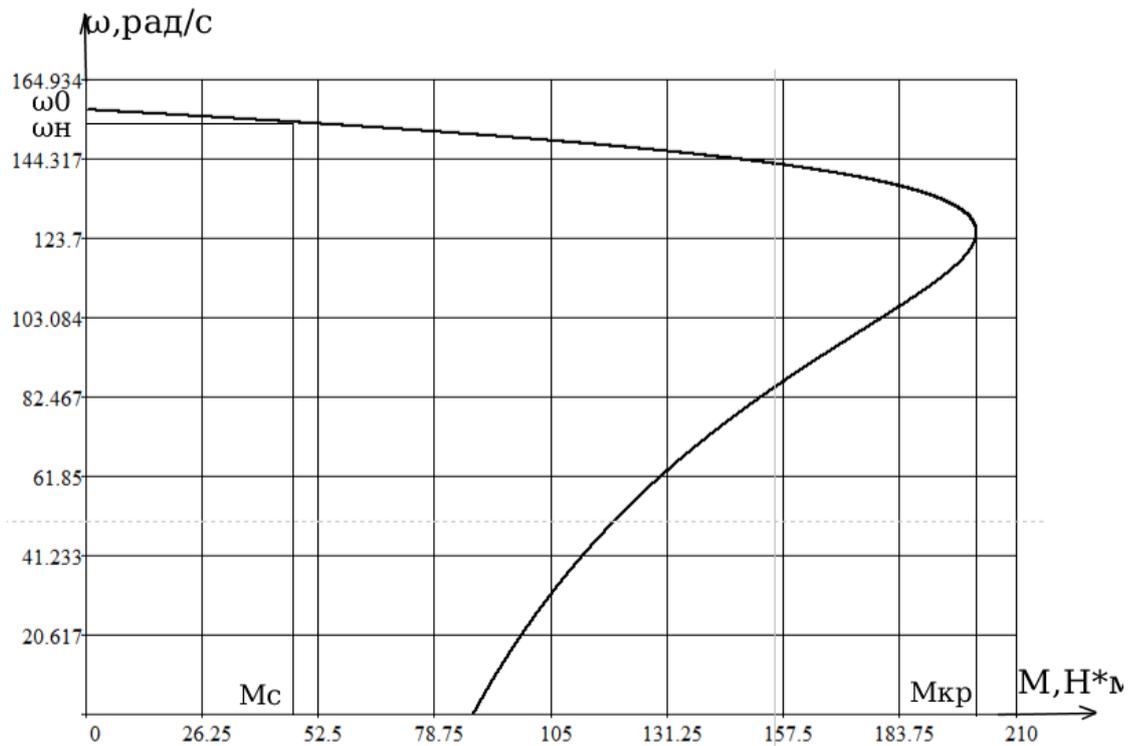


Рисунок 7 – Естественная механическая характеристика АД

3.5 Расчет искусственных механических и электромеханических характеристик системы регулируемого электропривода для заданного диапазона регулирования скорости

В соответствии с полученным заданием был выбран частотный закон регулирования $\frac{U_1}{f_1} = const$.

Следует рассчитать и построить семейство механических характеристик электродвигателя при двух разных частотах f_{01} и f_{02} .

Для этого определяются угловые скорости по ступеням:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{m1}}{60} = \frac{6,28 \cdot 1900}{60} = 198,95 \text{ рад / с}$$

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{m2}}{60} = \frac{6,28 \cdot 500}{60} = 52,359 \text{ рад / с}$$

где $n_{m1} = 1900$ об/мин и $n_{m2} = 500$ об/мин максимальная и минимальная рабочие скорости двигателя ПСУ.

Частоты для искусственных характеристик:

$$f_{01} = \frac{9,55 \cdot \omega_1 \cdot p}{60} = \frac{9,55 \cdot 198,95 \cdot 2}{60} \approx 63,7 \text{ Гц}$$

$$f_{02} = \frac{9,55 \cdot \omega_{02} \cdot p}{60} = \frac{9,55 \cdot 52,359 \cdot 2}{60} \approx 16,7 \text{ Гц}$$

В соответствии с законом частотного регулирования $\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$ при работе на естественной характеристике: $Z_p = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = \frac{220}{50} = 4,4 = const$.

Значения частот питающего напряжения:

$$f_{1H1} = 50 \text{ Гц}; f_{1ж1} = \frac{f_{1H1}}{f_{1H}} = 1;$$

$$f_{1H2} = 30 \text{ Гц}; f_{1ж2} = \frac{f_{1H2}}{f_{1H}} = 0,6;$$

$$f_{1H3} = 63,7 \text{ Гц}; f_{1ж3} = \frac{f_{1H3}}{f_{1H}} = 1,274;$$

$$f_{1H4} = 16,7 \text{ Гц}; f_{1ж4} = \frac{f_{1H4}}{f_{1H}} = 0,334.$$

Фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^2 = 220 \text{ В}$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^2 = 132 \text{ В}$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H3}^2 = 280,28 \text{ В}$$

$$U_{1H4} = Z_p \cdot f_{1H4}^2 = 73,48 \text{ В}$$

Коэффициенты IR-компенсации:

$$K_{KM1} = 0; K_{KM2} = 0,25; K_{KM3} = 0,5; K_{KM4} = 0,75.$$

Эквивалентные сопротивления ротора с учетом IR-компенсации:

$$R_{1экв1} = R_1 = 0,396 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 0,396 \cdot (1 - 0,25) = 0,297 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}) = 0,396 \cdot (1 - 0,5) = 0,198 \text{ Ом};$$

$$R_{1экв4} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 0,396 \cdot (1 - 0,75) = 0,099 \text{ Ом};$$

Расчет и построение электромеханических характеристик с IR-компенсацией, определяющие зависимость приведенного тока ротора от скольжения будет производиться по следующей формуле:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_{1экв} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_{1экв} R_2'}{s X_{\mu H} f_{1*}} \right)^2}},$$

и представлены на рисунке 8.

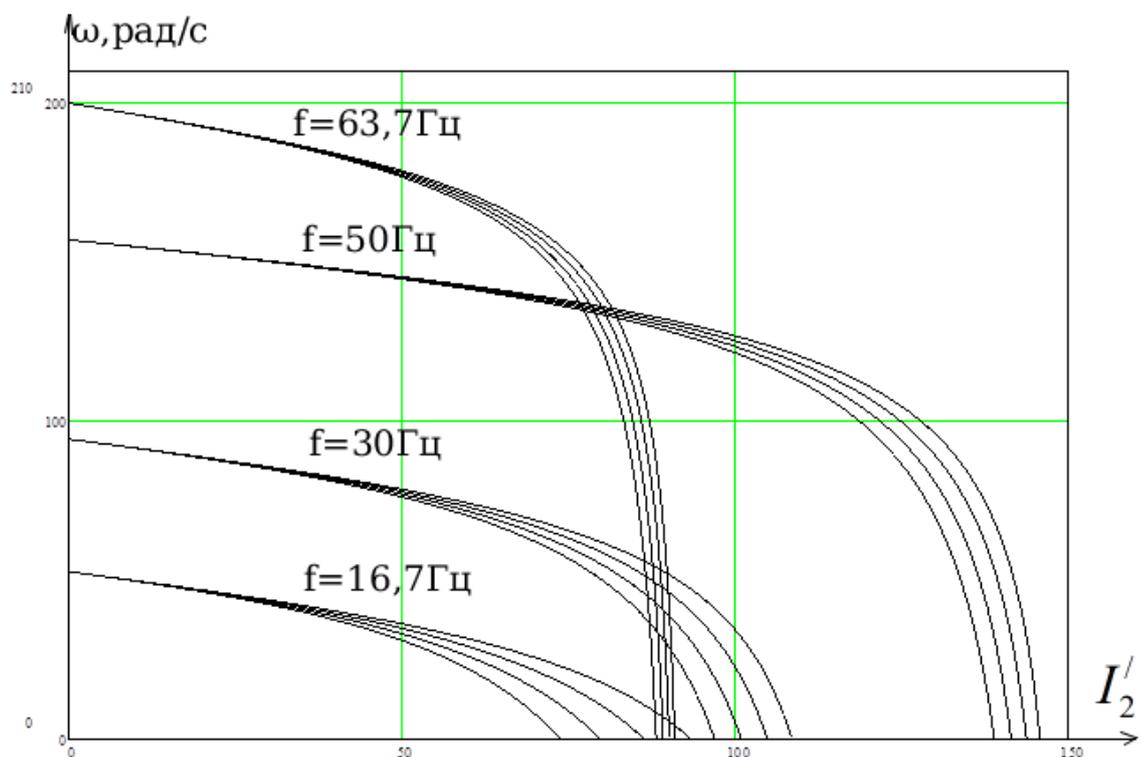


Рисунок 8 – Зависимость скорости вращения от тока ротора при различных частотах с учетом IR-компенсации

Расчет и построение электромеханических характеристик с IR - компенсацией, определяющие зависимость тока статора от скольжения.

Построение характеристик производится с помощью уравнения:

$$I_{1j}(s) = \sqrt{I_0^2 + I_{2j}'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2j}'(s) \cdot \sin \varphi_2} \cdot \frac{X_{KH} f_{1*}}{\sqrt{\left(R_{1экв} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2}},$$

Полученный результат представлен на рисунке 9.

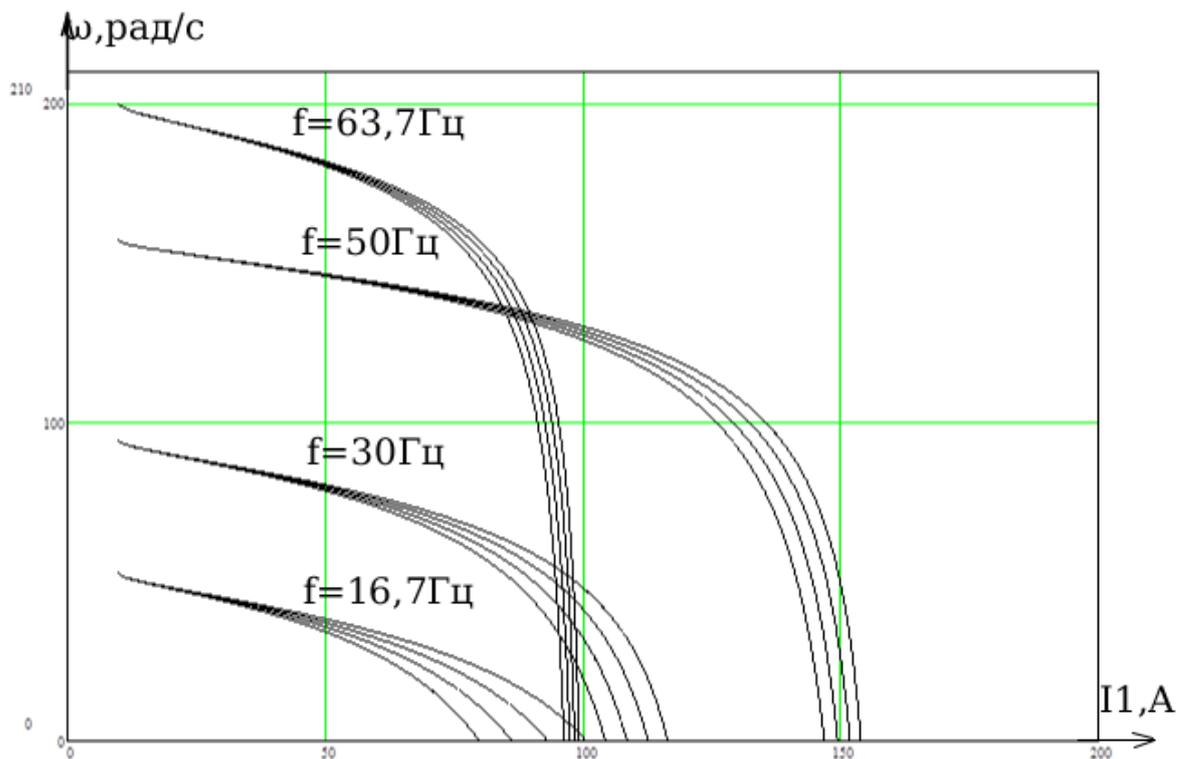


Рисунок 13 – Зависимость скорости вращения от тока статора при различных частотах с учетом IR-компенсации

Расчет и построение механических характеристик с IR-компенсацией при переменных значениях величины и частоты напряжения питания производится по следующей формуле:

$$M(s) = \frac{3U_{1j}^2 R_2'}{\omega_{0j} s_j \left[X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_j \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

наглядно характеристики представлены на рисунке 10.

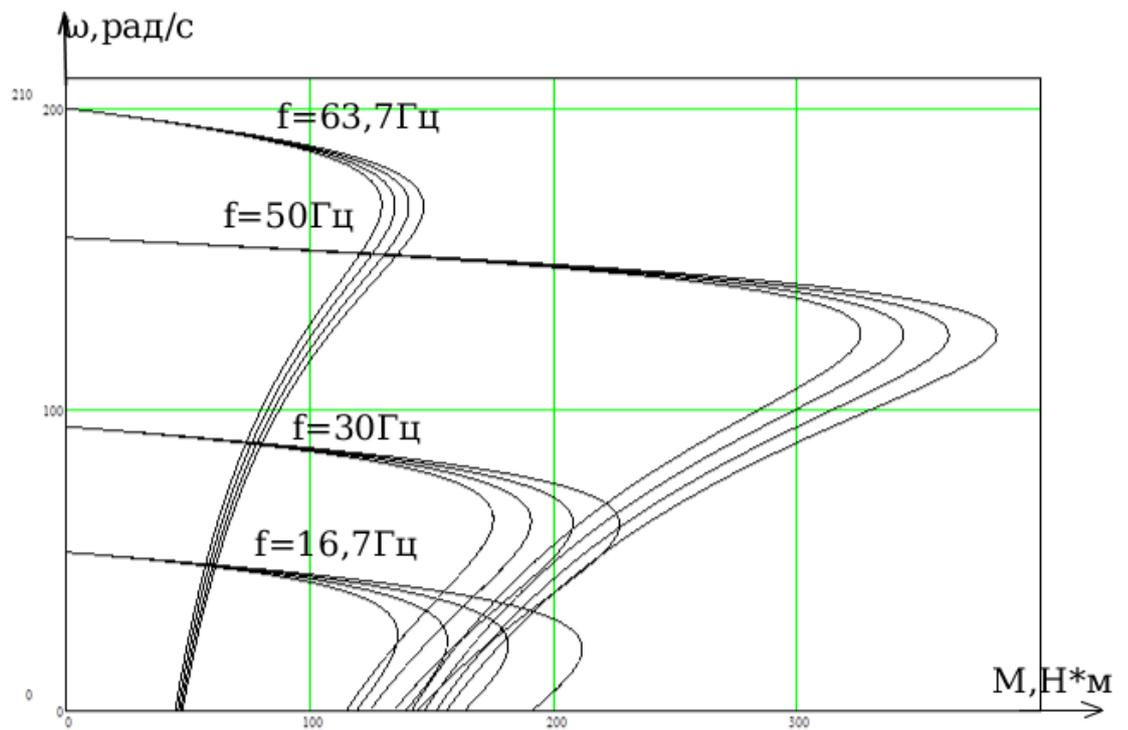


Рисунок 10 – Зависимость скорости вращения от момента при различных частотах с учетом IR-компенсации

3.6 Выбор преобразователя частоты



Для регулирования выбран преобразователь частоты фирмы Siemens, модель устройства Micromaster 430 (6SE6430-2UD31-1CA0). Производитель занимает одну из ведущих позиций на рынке преобразовательных устройств, т.к. продукты отличаются высокой надежностью и простотой управления. Основные параметры ПЧ приведены в таблице 7.

Рисунок 11 – Преобразователь частоты Siemens Micromaster 440

Паспортные данные выбранного преобразователя частоты сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Паспортные данные преобразователя частоты

Типоразмер	Макс. мощность двигателя, кВт	Номинальный выходной ток, А	Базовый ток нагрузки, А	Ток перегрузки, А	Номинальный ток звена пост. тока, А	Потребляемый ток, А	Потери при 2.5 кГц, кВт	Примерный вес, кг
F5C	11	26	23,6	35,6	31	28,6	0.47	20

Принимаем несущую частоту инвертора $f_{\text{ШИМ}} = 8$ кГц.

4 Имитационное моделирование асинхронного электропривода шнекового питателя сырого угля со скалярным управлением

4.1 Моделирование прямого пуска асинхронного двигателя

При исследовании динамики АД принимаем ряд допущений:

- 1) параметры обмоток всех фаз будут иметь одинаковые значения, т.е. наблюдается симметричный режим работы;
- 2) магнитное поле электродвигателя будет иметь вдоль воздушного зазора синусоидальное распределение;
- 3) вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе двигателя и его перемагничиванием потери в стали учитываться не будут;
- 4) насыщение магнитной цепи АД не будет учитываться;
- 5) эффект вытеснения токов в проводниках ротора пренебрежимо мал.

Структурная схема модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат представлена на рисунке 12[6].

Полная индуктивность цепи статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 0,00249 + 0,064 = 0,06649 \text{ Гн};$$

Полная индуктивность цепи ротора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_\mu = 0,00335 + 0,064 = 0,06735 \text{ Гн}.$$

Коэффициенты структурной схемы:

$$K_r = \frac{L_\mu}{L'_2} = \frac{0,064}{0,06735} = 0,9503;$$

$$L_e = L_1 - \frac{L_\mu^2}{L'_2} = 0,06649 - \frac{0,064^2}{0,06735} = 0,008 \text{ Гн};$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 0,396 + 0,386 \cdot 0,9503^2 = 0,745 \text{ Ом};$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,386}{0,06735} = 5,731.$$

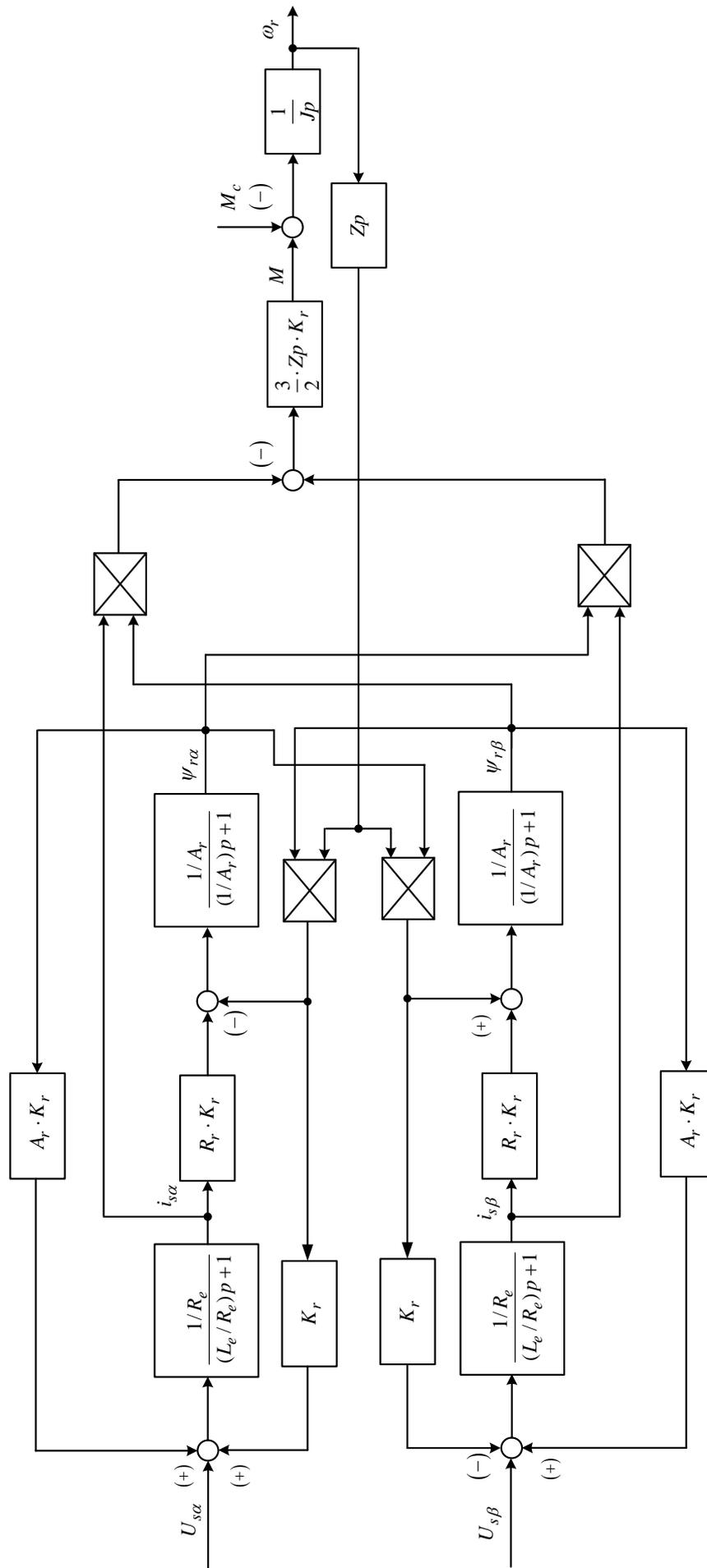


Рисунок 12 – Структурная схема модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

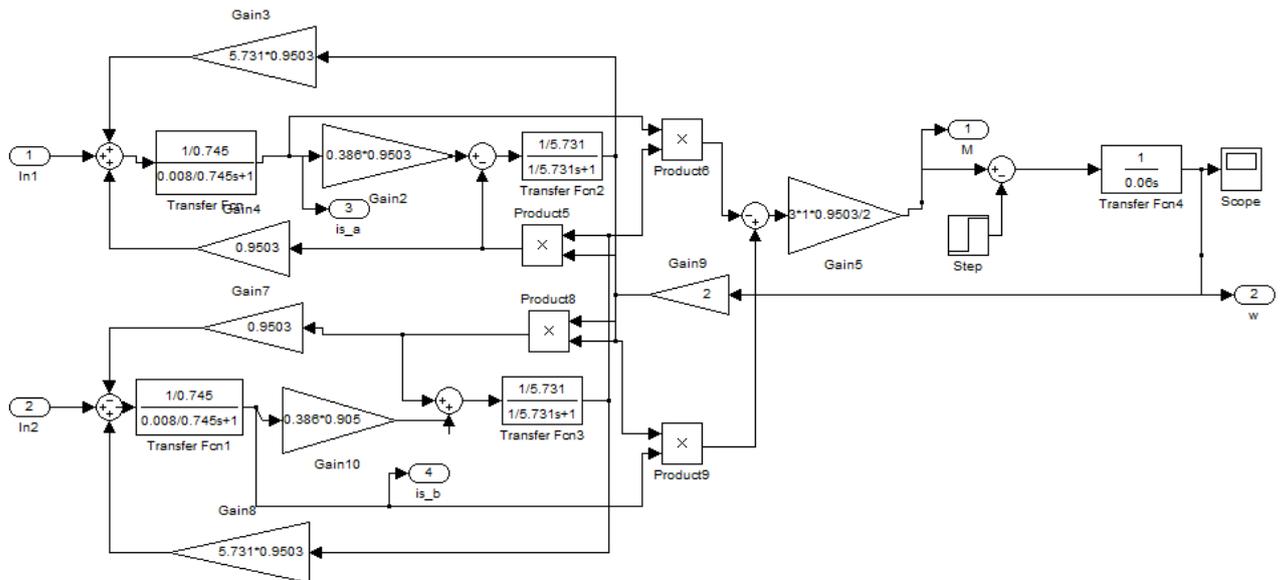


Рисунок 13 – Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат в программной среде MATLAB Simulink

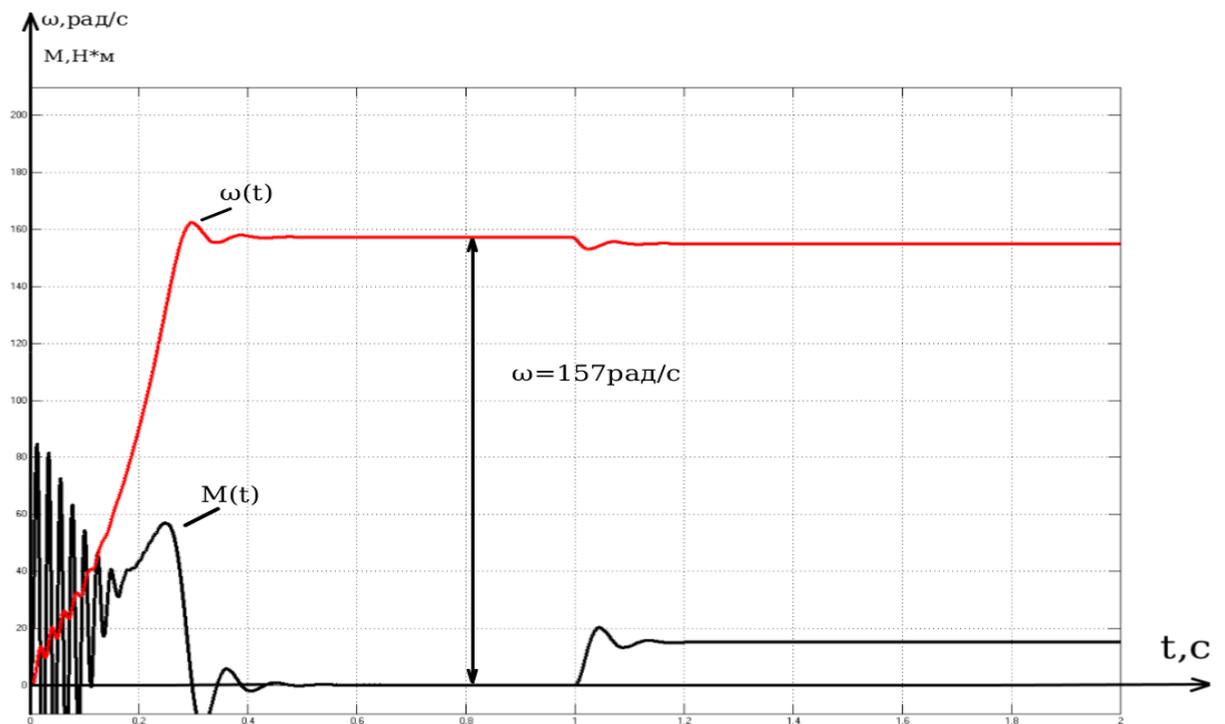


Рисунок 14 – Переходные процессы в АД при прямом пуске и набросе номинальной нагрузки

Полученные результаты говорят об адекватности собранной модели, так как скорость вышла на номинальное значение, время переходного процесса составило около 0,3с., система выдержала наброс номинальной нагрузки и значение перерегулирования не является критичным.

4.2 Моделирование прямого пуска электродвигателя с частотным законом управления $U/f=\text{const}$

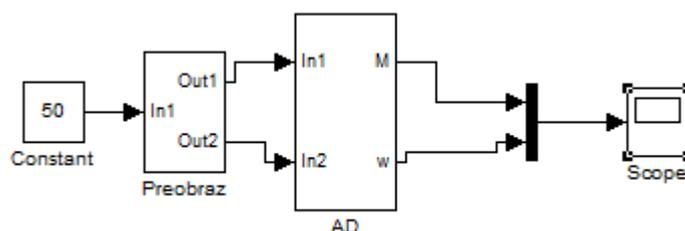


Рисунок 15 – Имитационная модель силового канала электропривода

Схема набора имитационной модели двухфазного преобразователя частоты, представленного подсистемой «Preobraz» представлена на рисунке 16.

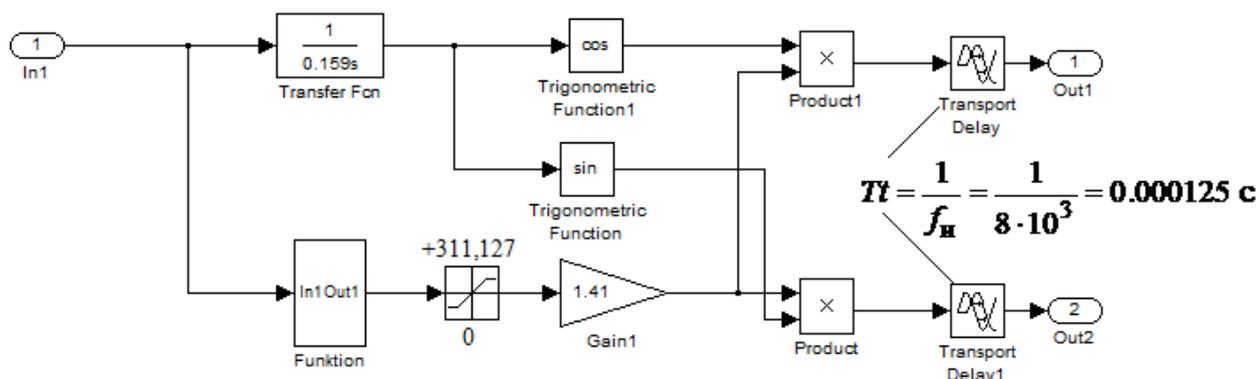


Рисунок 16 – Схема набора имитационной модели двухфазного преобразователя частоты

Подсистема «Funktion» реализует математическую функцию

$$U_{1\phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} = 220 \cdot \frac{x}{50}$$

– при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$.



Рисунок 17 – Подсистема «Funktion» при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

Модель двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат представлена в подсистеме «AD».

В подсистеме «Reaktivnaja nagruzka» организована реактивная нагрузка.

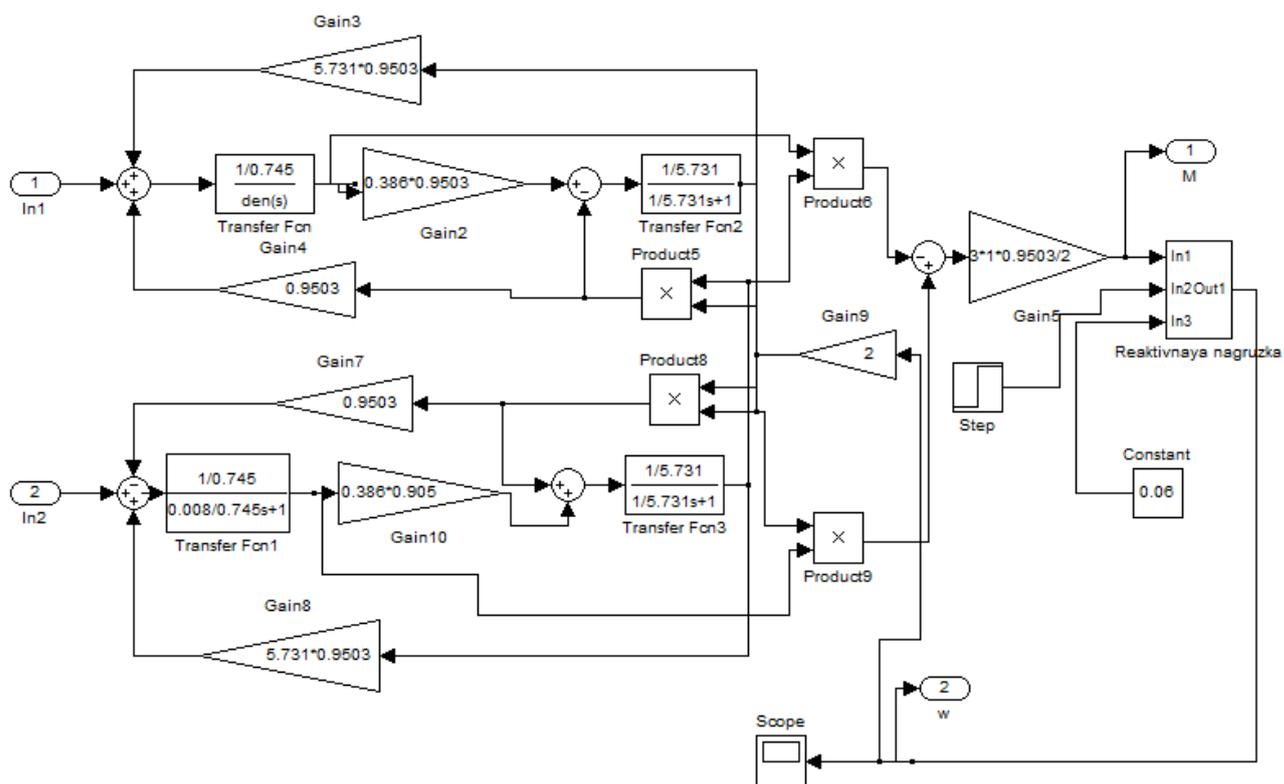


Рисунок 18 – Подсистема «AD»

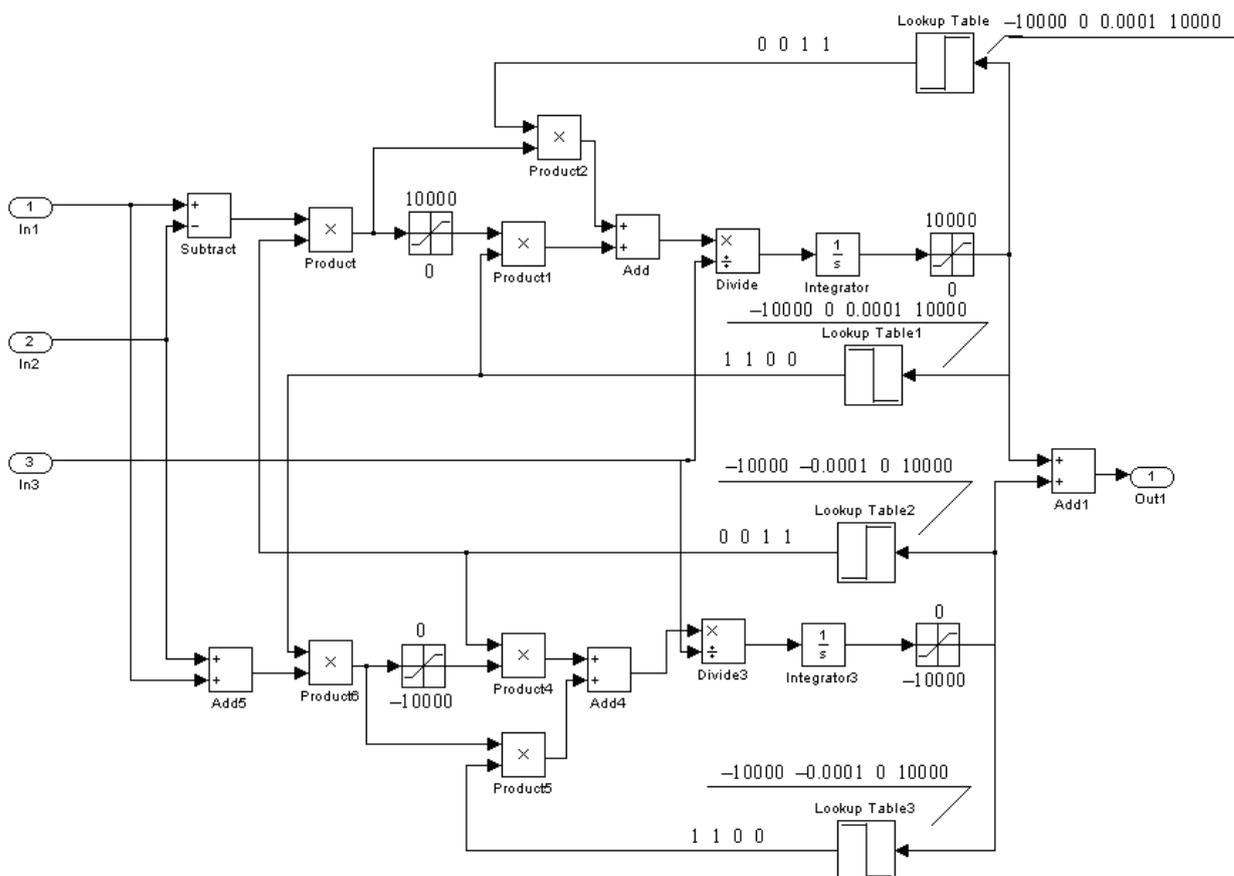


Рисунок 19 – Подсистема «Reaktivnaya nagruzka»

Моделирование производится при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$.

Результаты имитационных исследований прямого пуска электродвигателя при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ и значений частоты $f_{11} = 16,7$ Гц, $f_{12} = 50$ Гц и $f_{13} = 63,7$ Гц приведены, на рисунке 20.

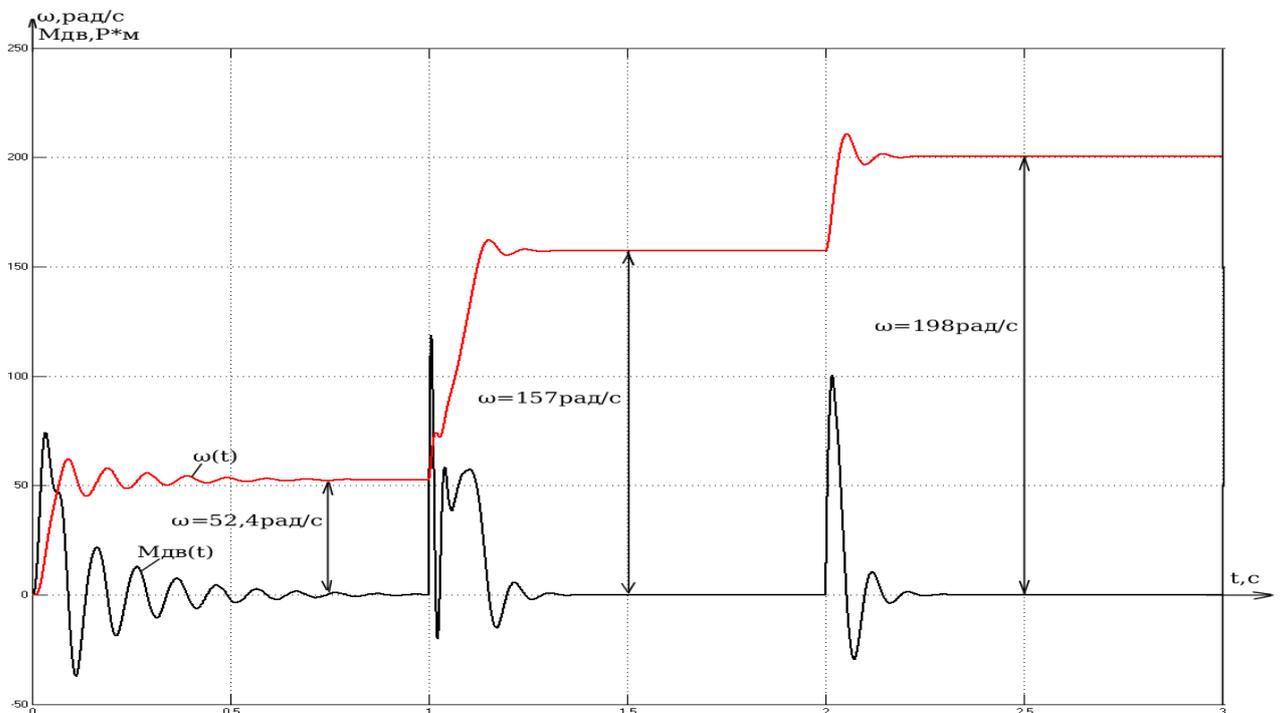


Рисунок 20 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значениях частоты

$$f_{11} = 16,7 \text{ Гц}, f_{12} = 50 \text{ Гц} \text{ и } f_{13} = 63,7 \text{ Гц}$$

Задатчик интенсивности с s -образной характеристикой позволит дополнительно ограничить вторую производную скорости (темп нарастания динамического момента электропривода) и тем самым повысить плавность переходных процессов в электроприводе.

Применение задатчика интенсивности скорости простейшим образом решает проблему ограничения динамических нагрузок в электроприводах, в которых невозможны механические перегрузки в рабочих режимах.

4.3 Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

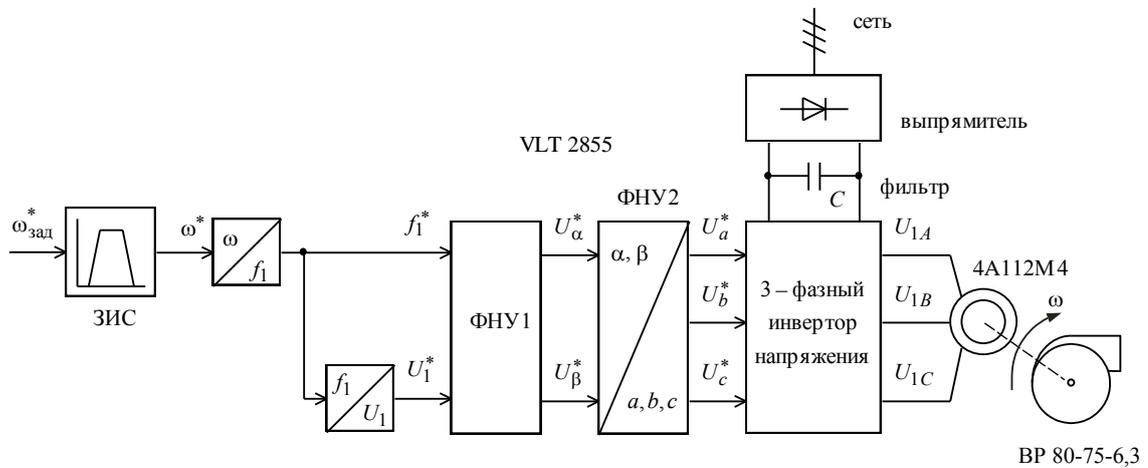


Рисунок 21 - Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

Имитационная модель асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Схема набора имитационной модели асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением приведена на рисунке 22.

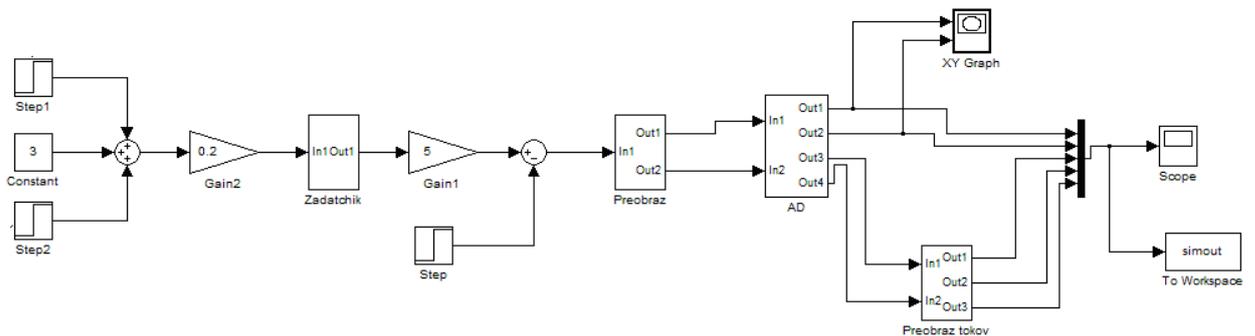


Рисунок 22 - Схема набора имитационной модели асинхронного электропривода со скалярным управлением

Имитационная модель задатчика интенсивности с s-образной характеристикой

Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S -образной характеристикой представлена на рисунке 23. Принята S -образная характеристика задатчика $U_{\text{зад}}(t)$ с параметрами (рисунок 24): $t_1 = 0.5 \text{ с}, t_2 = 1 \text{ с}, T_{\text{зи}} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2 \cdot 0.5 + 1 = 2 \text{ с}$.

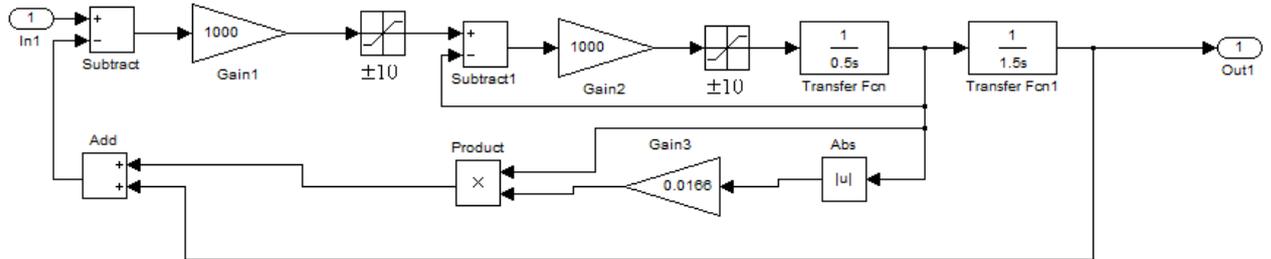


Рисунок 23 - Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с s -образной характеристикой (подсистема «Zadatchik»)

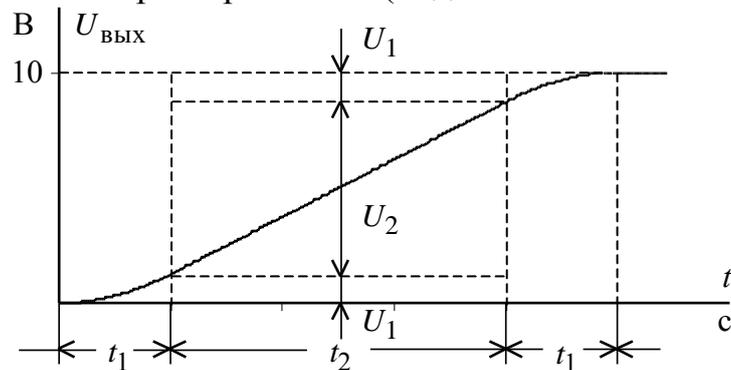


Рисунок 24 - Временная характеристика s -образного задатчика интенсивности

Имитационная модель преобразователя токов статора

Схема набора имитационной модели преобразователя токов статора $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ в двухфазной неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} приведена на рисунке 25. Преобразование токов выполняется в соответствии с формулами:

$$i_{1A} = I_{1\alpha}; \quad i_{1B} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}; \quad i_{1C} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}.$$

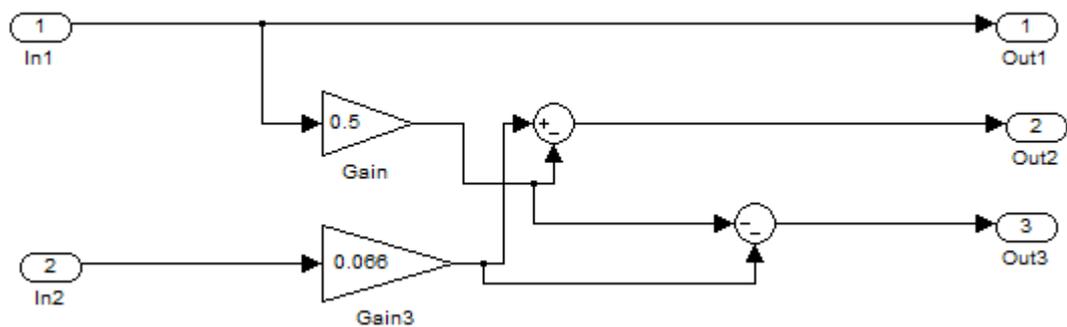


Рисунок 25 - Схема набора имитационной модели преобразователя токов статора $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ в двухфазной неподвижной системы координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} (подсистема «Преобраз токов»)

Цикл работы электропривода с S-образной характеристикой задатчика интенсивности представлен на рисунке 26 и отражает следующие этапы работы механизма: А–разгон до минимальной скорости работы привода; В и D–работа на минимальной скорости;С–наброс и сброс нагрузки; Е–разгон до номинальной скорости двигателя;F и H–работа на номинальной скорости электродвигателя;G–наброс и сброс нагрузки;I–разгон до максимальной скорости привода;K и M–работа на максимальной скорости;L– наброс и сброс нагрузки; N–остановка двигателя.

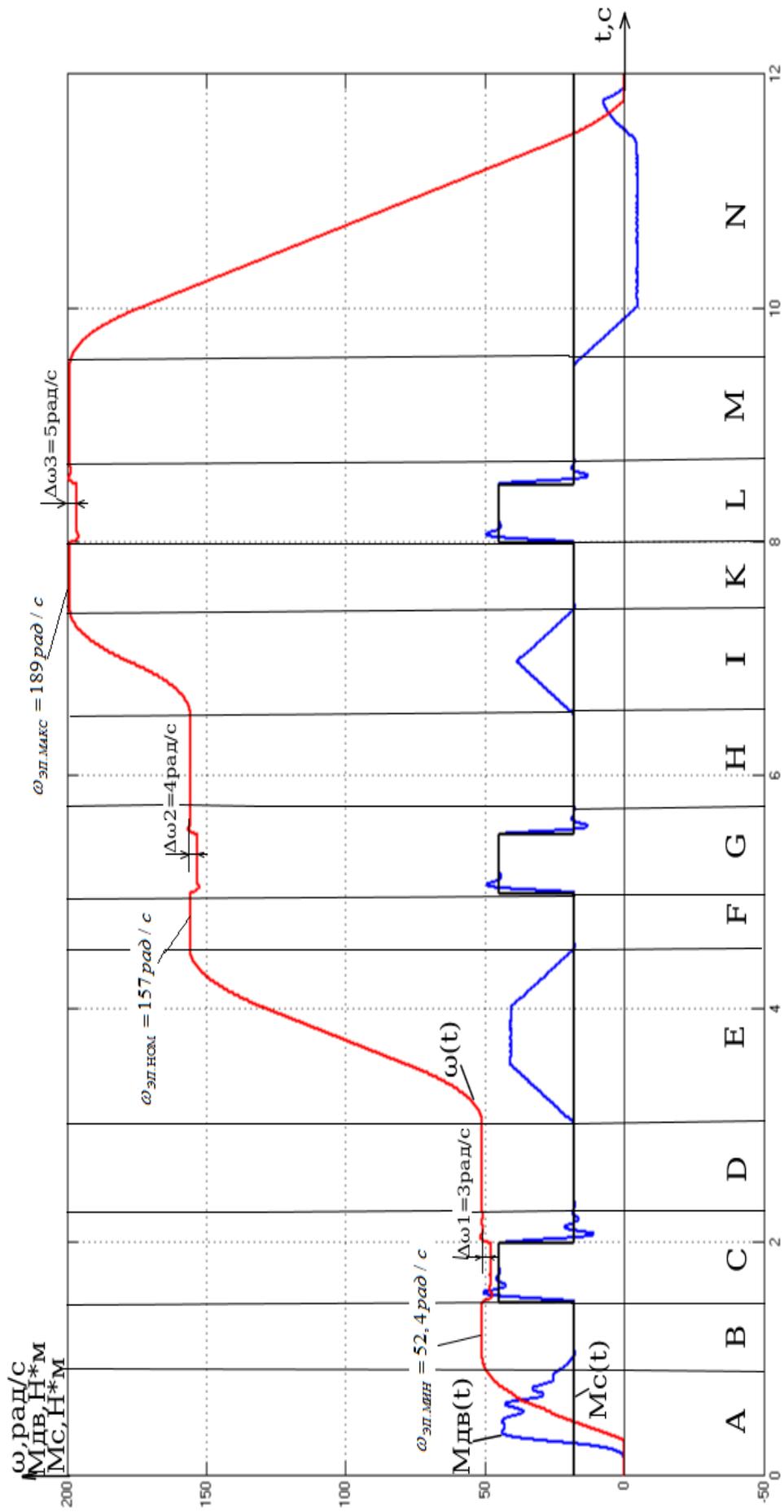


Рисунок 26 – Цикл работы электропривода с S-образной характеристикой задачика интенсивности

Имитационное моделирование подтвердило правильность выбора двигателя и преобразователя частоты, расчетов механических и электромеханических характеристик. Просадка скорости под нагрузкой находится в приемлемых пределах. Это доказывает, что асинхронный двигатель с частотным управлением способен обеспечить все требования по диапазону регулирования скорости привода шнекового питателя сырого угля и его перегрузочной способности.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был рассчитан и спроектирован регулируемый электропривод на основе системы ПЧ-АД для шнекового питателя сырого угля применяемого на Томь-Усинской ГРЭС. На основе данных о шнеке и редукторе произведен выбор двигателя АИР132М4. После выбора преобразователя были определены параметры схемы замещения двигателя и рассчитаны механические и электромеханические характеристики разомкнутой системы преобразователь – двигатель. Так же был произведен выбор преобразователя частоты, модель: Siemens Micromaster 440. Далее на основе функциональной и структурной схемы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением было выполнено моделирование двухфазного асинхронного электродвигателя с реактивной нагрузкой, силового канала, преобразователя частоты и задатчика интенсивности в среде MatLAB Simulink. Имитационное исследование доказало работоспособность электропривода на всем диапазоне скоростей и по его перегрузочной способности. Цикл работы включил в себя разгон и работу на трех скоростях, две из которых являются границами диапазона регулирования, набросе и сбросе нагрузки на каждой скорости и останов двигателя.

Были спланированы этапы работ, определена трудоемкость, а также разработан график проведения научного исследования. В итоге был сформирован бюджет затрат научно-исследовательского проекта.

Также было проанализировано рабочее место инженера-проектировщика, выявлены вредные и опасные факторы в помещении, угрозы окружающей среде, объявлены необходимые для их устранения меры.

Список используемых источников

1. Петров А.В., Татаринцев Н.И. Применение частотно-регулируемых приводов на питателях сырого угля // Автоматизация и современные технологии. – 2005. – №6.
2. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно регулируемый электропривод. Издание 2-е переработанное и дополненное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 648 с.
3. Картошкин М.Д. Топливоподача тепловых электростанций. – М, 1961.–208с.
4. Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К., Шлаф М.М. Выбор и применение асинхронных двигателей. М., Энергоатомиздат, 1987. –283с.
5. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
6. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
7. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г;
8. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с;
9. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с;

10. Романенко С.В Социальная ответственность – С.В. Романенко, Ю.В. Анищенко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 11 с.
11. Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы. Санитарные правила и нормы 2.2.2 2.4.1340 – 03. – М., 2003
12. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
13. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640с.
14. ПОТ РМ-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.