



Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО
ПРОЕКТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД**

Направление (код) подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Профиль подготовки Электрооборудование и электрохозяйство горных
и промышленных предприятий
Уровень высшего образования бакалавриат
(бакалавриат, специалитет, магистратура)

Автор - разработчик: Фёдорова С. В., канд.техн.наук, доцент
Рассмотрено на заседании кафедры энергетики
Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма
2021

Введение

Правильный выбор элементов электротехнических систем и необходимых статических и динамических характеристик определяют не только производительность рабочего механизма, но и качество выпускаемой продукции. Большое число реализуемых с помощью электропривода технологических процессов определяет многообразие уже действующих и вновь создаваемых электроприводов. Между собой они различаются назначением, степенью автоматизации, характером движения двигателя, используемой элементной базой и многими другими признаками.

Основной задачей курсового проектирования по дисциплине «Электрический привод» является закрепление и систематизация знаний по электрическому приводу, умения производить технические расчеты, развитие навыков самостоятельной работы с использованием специальной технической литературы, работы с программным продуктом МАТЛАБ и умение строить математические модели электроприводов, умения обосновывать эффективность полученного технического решения.

Целью выполнения курсового проекта является закрепление знаний по блоку общепрофессиональных дисциплин: теория электропривода, прикладная механика, электротехника, электроника.

Курсовой проект выполняется в соответствии с индивидуальным заданием для каждого студента.

Объектом проектирования для студентов являются производственный электропривод, который необходимо модернизировать.

Курсовое проектирование способствует формированию профессиональных (ПК) компетенций: готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5), способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Студент при выполнении проекта должен уметь свободно пользоваться нормативной документацией и справочной литературой.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки на 20–30 страницах, включающей графический материал. Требования к оформлению пояснительной записки представлены ниже.

Бланки титульного листа, задания и рецензии на курсовую работу представлены в приложении 1, 2 и 3.

1. Требования к содержанию и оформлению пояснительной записки к курсовому проекту

В пояснительной записке объемом 20-30 страниц текста, включая необходимые иллюстрирующие материалы (чертежи, схемы, графики, рисунки) излагается идея и существо работы, приводятся результаты теоретических расчетов, приводят выводы.

При написании записки студент обязан давать ссылки на автора и источники, откуда он заимствует материал или отдельные результаты. В тексте пояснительной записки недопустимыми являются орфографические и синтаксические ошибки и опечатки, небрежное оформление рисунков, таблиц, схем.

Пояснительная записка курсовой работы должна содержать следующие структурные части:

- Титульный лист;
- Задание;
- Содержание;
- Обозначения и сокращения;
- Введение;
- Основная часть;
- Заключение;
- Список использованных источников;
- Приложения.

2. Содержание пояснительной записки

Структурные части пояснительной записки начинают с нового листа, заголовки не нумеруют и размещают по центру строки. Исключение — заголовки основной части и приложения. Заголовки основной части начинают с абзацного отступа. Пояснительная записка переплетается либо вставляется в стандартные папки для дипломных работ. Пояснительная записка подписывается студентом на титульном листе с указанием даты окончания работы.

2.1. Титульный лист

Титульный лист является началом пояснительной записки. Пример оформления титульных листов приведены в приложении №1. На титульном листе указываются: полное наименование учебного заведения, структурного подразделения, оценка работы, тема работы, инициалы и фамилия студента и руководителя, город и год выполнения. На титульном листе должны быть подписи всех вышеуказанных лиц с указанием даты.

2.2. Задание

Задание на курсовой проект составляется по установленной форме, руководителем работы и студентом и помещается на странице, следующей за титульным листом. Задание не нумеруется.

2.3. Содержание

Содержание должно включать: введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов, заключение, список использованных источников и

наименование приложений с указанием номеров страниц (ГОСТ 7.32-2017), с которых начинаются эти элементы.

2.4. Обозначения и сокращения

Раздел должен содержать перечень обозначений и сокращений, применяемых в пояснительной записке. Запись обозначений и сокращений проводят в порядке приведения их в тексте записки с необходимой расшифровкой и пояснениями. Допускаются определения, обозначения и сокращения приводить в одном структурном элементе «Определения, обозначения и сокращения».

2.5. Введение

Введение к пояснительной записке должно содержать обоснование выбранного производственного электропривода.

2.6. Основная часть

Основной текст пояснительной записки, определяющий ее содержание, должен излагаться в строгой логической последовательности. Независимо от разнообразия задач и методов их решения основная часть пояснительной записки должна содержать следующие разделы:

- Назначение приводного механизма и его технические характеристики
- Назначение и требования к электроприводу, его номинальные параметры
- Обоснование целесообразности модернизации электропривода
- Расчет параметров полной математической модели электродвигателя
- Построение графиков переходных процессов и электромеханической характеристики двигателя
- Синтез замкнутой по скорости системы скалярного управления
- Модель системы векторного управления

2.7. Заключение

В разделе должны отражаться основные результаты проделанной работы, оценка полноты решений поставленных задач, рекомендации по практическому использованию полученных результатов. Объем заключения должен составлять не более 1 страницы.

2.8. Список использованных источников

В списке указываются все источники, использованные в процессе работы. На них должны иметься соответствующие ссылки в тексте пояснительной записки. Источники следует располагать в порядке появления ссылок в тексте записки, нумеровать арабскими цифрами без точки. Сведения об источниках, включенных в список, необходимо давать в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.9-2009.

3. Пример курсового проекта

3.1. Расчета параметров полной математической модели электродвигателя

Таблица 1- Паспортные характеристики двигателя

тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	КПД, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Динамический момент инерции ротора, кг·м ²
4MTM225L8	37	725	86	0,74	88	2,85	2,9	5,2	1,27

Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (dq-оси) системы координат. На рис. 1 приведена схема замещения машины и ее уравнения.

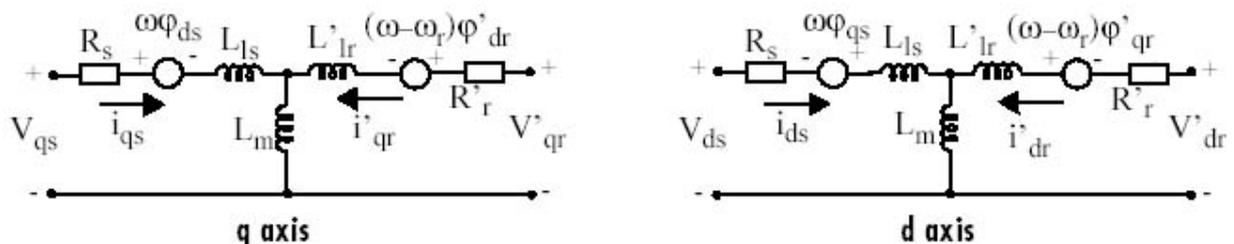


Рисунок 1 - Схема замещения асинхронной машины в двухфазной системе координат

Уравнения электрической части машины имеют вид:

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega \psi_{ds}, \quad u'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr},$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} + \omega \psi_{qs}, \quad u'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{qr},$$

$$T_e = 1.5(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}),$$

где

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}, \quad \psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs},$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}, \quad \psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds},$$

$$L_s = L_{ls} + L_m, \quad L'_r = L'_{lr} + L_m.$$

Индексы в системе уравнений машины имеют следующий смысл: d - проекция вектора на ось d , q - проекция вектора на ось q , r - переменная или параметр ротора, s - переменная или параметр статора, L - индуктивность рассеяния, m - индуктивность цепи намагничивания.

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m), \quad \frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m.$$

Переменные в уравнениях машины обозначают:

R_s, L_{ls} - сопротивление и индуктивность рассеяния статора,

R_r, L_{lr} - сопротивление и индуктивность рассеяния ротора,

L_m - индуктивность цепи намагничивания,

L_s, L_r' - полные индуктивности статора и ротора,

u_{qs}, i_{qs} - проекции напряжения и тока статора на ось q ,

u'_{qr}, i'_{qr} - проекции напряжения и тока ротора на ось q ,

u_{ds}, i_{ds} - проекции напряжения и тока статора на ось d ,

u'_{dr}, i'_{dr} - проекции напряжения и тока ротора на ось d ,

ψ_{ds}, ψ_{qs} - проекции потокосцепления статора на оси d и q ,

ψ'_{dr}, ψ'_{qr} - проекции потокосцепления ротора на оси d и q ,

ω_m - угловая скорость ротора, θ_m - угловое положение ротора,

p - число пар полюсов, T_e - электромагнитный момент.

Параметры асинхронной машины рассчитывают по следующим выражениям:

Номинальное фазное напряжение, В

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4$$

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

$$n_1 = \frac{60 \times f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{4} = 750$$

Номинальное скольжение, о. е.

$$S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{750 - 725}{750} = 0,033$$

Критическое скольжение, о. е.

$$S_{кр} = S_n \times (M_{нук} - \sqrt{M_{нук}^2 - 1}) = 0,033 \times (2,9 + \sqrt{2,9^2 - 1}) = 0,1854$$

Скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость), c^{-1}

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \times 3,14 \times 50}{4} = 78,5$$

Номинальная угловая скорость вращения вала, c^{-1}

$$\omega_n = \frac{\pi \times n_n}{30} = \frac{3,14 \times 725}{30} = 75,88$$

Номинальный момент, H^*m

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{37000}{75,88} = 487,61$$

Максимальный момент, Н*м

$$M_{max} = m_{max} \times M_n = 2,9 \times 487,61 = 1414,07$$

Пусковой момент, Нм

$$M_n = m_n \times M_n = 2,85 \times 487,61 = 1389,69$$

Пусковой ток, А

$$I_n = k_n \times I_n = 5,2 \times 88 = 457,6$$

Механические потери, Вт

$$P_{mex} = 0,03 \times P_n = 0,03 \times 37000 = 1110$$

Коэффициент приведения

$$C = 1,032, \text{ как правило } C = 1 + S_n$$

Приведенное активное сопротивление ротора, Ом

$$R'_2 = \frac{1}{3} \times \frac{P_n + P_{mex}}{I_n^2 \times \frac{1 - S_n}{S_n}} = \frac{1}{3} \times \frac{37000 + 1110}{88^2 \times \frac{1 - 0,033}{0,033}} = 0,056$$

Активное сопротивление статора, Ом

$$R_1 = \frac{U \cos \varphi (1 - \eta)}{I_n} - c^2 \times R'_2 - \frac{P_{mex}}{3I_n^2} = \frac{219,4 \times 0,74 \times (1 - 0,86)}{88} - 1,032^2 \times 0,056 - \frac{1110}{3 \times 88^2} = 0,151$$

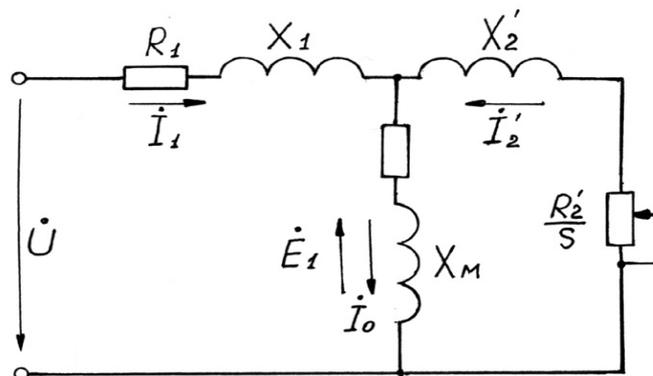


Рисунок 2 - Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

R_1, R_2', R_M – активные сопротивления фаз статора, ротора и ветви намагничивания;

X_1, X_2', X_M – индуктивные сопротивления рассеяния фаз статора ротора и ветви

Коэффициент перевода относительных единиц в именованные

$$C^* = \frac{U}{I_n} = \frac{219,4}{88} = 2,49$$

Приведенное активное сопротивление ротора, о.е.

$$r_2'^* = \frac{R'_2}{C^*} = \frac{0,056}{2,49} = 0,02249$$

Активное сопротивление статора, о.е.

$$r_1^* = \frac{R_1}{C^*} = \frac{0,151}{2,49} = 0,06064$$

Номинальная мощность при нагрузке 50%, Вт

$$P_{np^*} = p^* \times P_n = 0,5 \times 37000 = 18500, \text{ где } p^* = 0,5 \text{ коэффициент загрузки двигателя.}$$

Статорный ток при нагрузке 50%, А

$$I_{1p^*} = \frac{P_{np^*}}{m \times U_{1н} \times \eta^* \times \cos \varphi_{1н}^*} = \frac{18500}{3 \times 219,4 \times 0,8 \times 0,6} = 58,5,$$

где коэффициент мощности и КПД при 50% загрузке подобраны из каталожных данных аналогичного асинхронного двигателя (Асинхронные двигатели. Справочник. А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. И. Соболенская).

Ток идеального холостого хода, А

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \left(\frac{p^* \cdot (1 - s_H)}{(1 - p^* \cdot s_H)} \cdot I_H \right)^2}{1 - \left(\frac{p^* \cdot (1 - s_H)}{(1 - p^* \cdot s_H)} \right)^2}}$$

Отношение активных сопротивлений статора и ротора (коэффициент жесткости)

$$\beta = \frac{R_1}{CR'_2} = \frac{0,06064}{1,032 \times 0,02249} = 2,61$$

Система уравнений, описывающая работу асинхронной машины в режиме номинальной нагрузки:

$$\begin{cases} \dot{U} = -\dot{E}_1 + jX_1 \dot{I}_{1н} + R_1 \dot{I}_{1н}; \\ 0 = \dot{E}_1 + jX'_2 \dot{I}'_2 + R'_2 \frac{\dot{I}'_2}{s_H}; \\ \dot{I}_{1н} = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2); \end{cases}$$

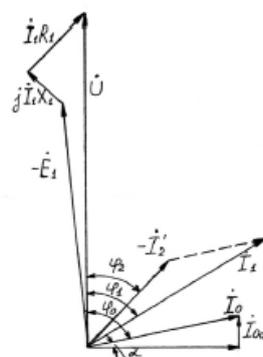


Рисунок 3 – Векторная диаграмма АД в режиме номинальной нагрузки

Угол между током и напряжением φ_0 при работе на холостом ходу предварительно принимаем 87° . Это значение не является константой, т.к. для двигателей разной мощности оно будет меняться. Так, для двигателя 630 кВт значение $\varphi_0 = 88^\circ$. Для двигателя 3 кВт $\varphi_0 = 87^\circ$.

Угол между током и напряжением при работе на холостом ходу, рад

$$\varphi_0 = \frac{87 \times \pi}{180} = \frac{87 \times 3,14}{180} = 1,52$$

Спроектируем токи на ось, проходящую через вектор U

$$I_{1н} \cos \varphi_{1н} = I_0 \cos \varphi_0 + I'_2 \cos \varphi_2 \quad (*)$$

Найдем проекцию тока ротора $I'_2 \cos \varphi_2$, для чего определим ток I_2^1 из системы (рис.3)

$$I'_2 = \frac{U}{Z_1 + CZ'_2}, \text{ где } Z_1 = R_1 + jX_1; \quad Z'_2 = R'_2 + jX'_2, \text{ тогда } I'_2 \cos \varphi_2 = \frac{U \left(R_1 + C \frac{R'_2}{S_n} \right)}{\left(R_1 + C \frac{R'_2}{S_n} \right) + (X_{1\delta} + CX'_{2\delta})}$$

Это соотношение представим в виде

$$I'_2 \cos \varphi_2 = \frac{U \left(\beta + \frac{1}{S_n} \right)}{CR'_2 \left(\left(\beta + \frac{1}{S_n} \right)^2 + \gamma^2 \right)}, \quad \text{где } \gamma = \frac{X_n}{CR'_2}; \quad X_n = X_{1\delta} + C_1 X'_{2\delta}$$

Подставляя в *), получим

$$U \left(\beta + \frac{1}{S_n} \right) = CR'_2 (I_{1n} \cos \varphi_{1n} - I_0 \cos \varphi_0) \times \left(\left(\beta + \frac{1}{S_n} \right)^2 + \gamma^2 \right)$$

Из уравнения критического скольжения

$$S_{kp} = \frac{CR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + CX'_2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}}$$

Промежуточный коэффициент

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{kp}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,1854^2} - 2,61^2} = 4,72$$

Общее индуктивное сопротивление, Ом

$$X_n = \gamma \times C \times R'_2 = 4,72 \times 1,032 \times 0,056 = 0,2728$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления X_n сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, Ом. Воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных АД, тогда:

$$X_{1\delta} = 0,42 \times X_n = 0,42 \times 0,2728 = 0,1146$$

$$X'_{2\delta} = 0,58 \times \frac{X_n}{C} = 0,58 \times \frac{0,2728}{1,032} = 0,1533$$

Индуктивность рассеяния статорной цепи, Гн

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{w_0} = \frac{X_{1\delta}}{2\pi f} = \frac{0,1146}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,365 \times 10^{-3}$$

Индуктивность рассеяния роторной цепи приведенная к статору, Гн

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_{2\delta}}{w_0} = \frac{X'_{2\delta}}{2\pi f} = \frac{0,1533}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,488 \times 10^{-3}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора, о.е.

$$x_1^* = \frac{X_{1\delta}}{C^*} = \frac{0,1146}{2,49} = 0,046$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора, о.е.

$$x'_2{}^* = \frac{X'_{2\delta}}{C^*} = \frac{0,1533}{2,49} = 0,0615$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, В

$$E_1 = \sqrt{(U \cos \varphi_{1n} - I_{1n} R_1)^2 + (U \sin \varphi_{1n} - I_{1n} X_{1\delta})^2} = \sqrt{(219,4 \times 0,74 - 88 \times 0,056)^2 + (219,4 \times 0,67 - 88 \times 0,1146)^2} = 210,58$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания, Ом

$$X_M = \frac{E_1}{I_0} = \frac{210.58}{45} = 4,68$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания, о.е.

$$x_M^* = \frac{X_M}{C^*} = \frac{4,68}{2,49} = 1,879$$

Индуктивность цепи намагничивания, Гн

$$L_M = \frac{X_M}{\omega_0} = \frac{X_M}{2\pi f} = \frac{4,68}{2 \times 3,14 \times 50} = 14,904 \times 10^{-3}$$

Постоянные потери в асинхронной машине, Вт

$$P_0 = 0,005 \frac{P_{2n}}{\eta_n} = \frac{37000}{0,74} = 0,005 \times \frac{37000}{0,74} = 250$$

Магнитные потери от постоянных потерь, Вт

$$P_M = 0,66 \times P_0 = 0,66 \times 250 = 165$$

Фиктивное активное сопротивление цепи намагничивания, Ом

$$R_M = \frac{P_M}{I_0^2} = \frac{165}{45^2} = 0,0815$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания, о.е.

$$r_M^* = \frac{R_M}{C^*} = \frac{0,0815}{2,49} = 0,0327$$

Таблица 2 - Результаты расчета параметров Т-образной схемы замещения АД

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
<i>Технические данные</i>	
Синхронная скорость вращения ω_c , рад/с	78,5
Номинальная скорость вращения ротора ω_n , рад/с	75,88
Номинальный момент M_n , Н·м	487,61
Пусковой момент M_p , Н·м	1389,69
Максимальный момент M_{max} , Н·м	1414,07
Номинальный ток статорной обмотки I_n , А	88
Пусковой ток I_p , А	457,6
Ток холостого хода I_0 , А	45
Критическое скольжение s_k , о.е.	0,1854
<i>Параметры схемы замещения в абсолютных единицах</i>	
Активное сопротивление фазы статора R_1 , Ом	0,151
Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора R'_2 , Ом	0,056
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора $X_{1\sigma}$, Ом	0,1146
Приведенное к статору индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора $X'_{2\sigma}$, Ом	0,1533
Фиктивное активное сопротивление цепи намагничивания R_m , Ом	0,0815
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания X_m , Ом	4,68
Индуктивность рассеяния статорной цепи $L_{1\sigma}$, мГн	0,365
Приведенная к статору индуктивность рассеяния роторной цепи $L_{2\sigma}$, мГн	0,488
Индуктивность цепи намагничивания L_m , мГн	14,904
<i>Параметры схемы замещения в относительных единицах</i>	
Активное сопротивление фазы статора r_{1*} , о.е.	0,0606
Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора r'_{2*} , о.е.	0,0225
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора x_{1*} , о.е.	0,046
Приведенное к статору индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора x'_{2*} , о.е.	0,0615
Фиктивное активное сопротивление цепи намагничивания r_{m*} , о.е.	0,0327
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания x_{m*} , о.е.	1,879

Построение графиков переходных процессов и электромеханической характеристики двигателя

На рис. 3 показана схема, обеспечивающая прямой пуск двигателя и последующее возрастание нагрузки.

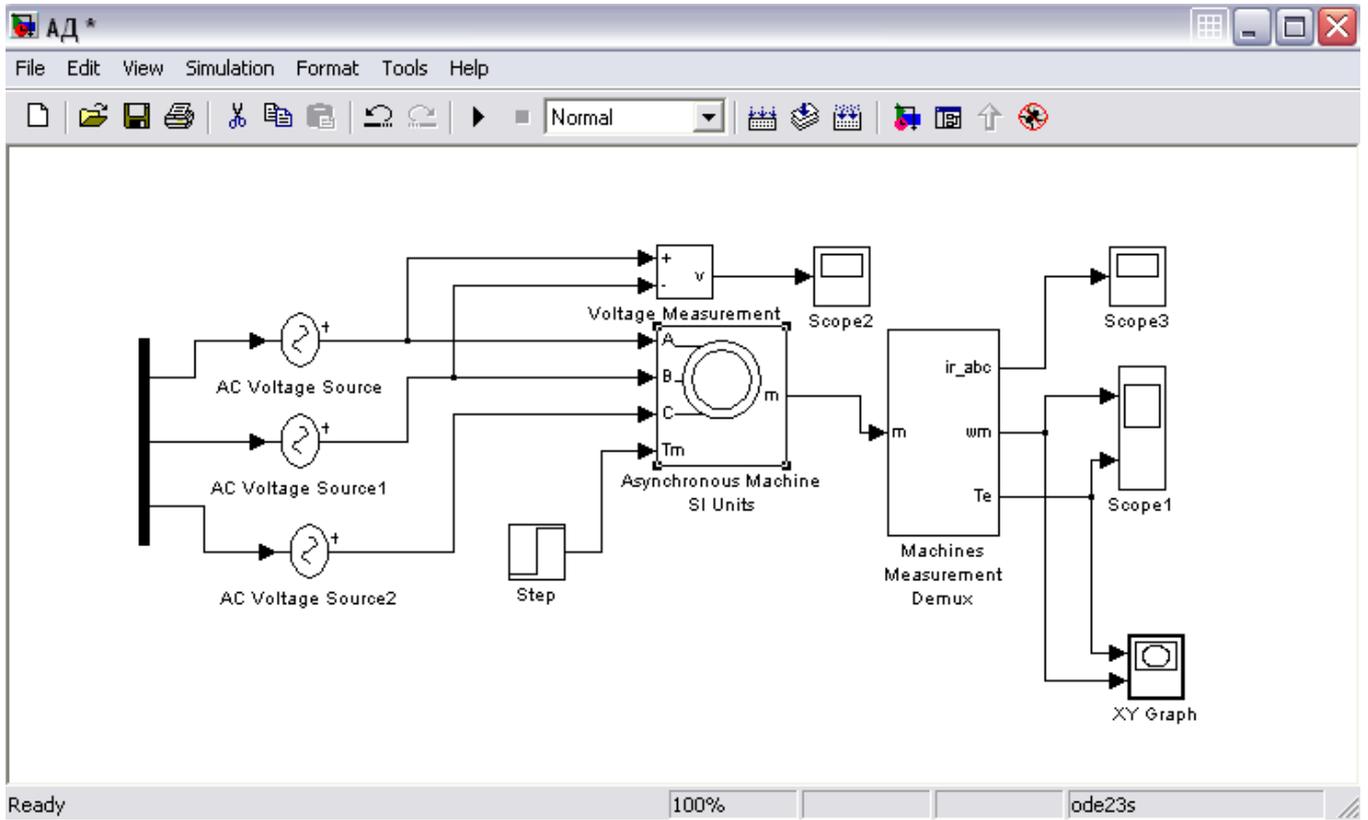


Рисунок 3 - Схема прямого пуска двигателя

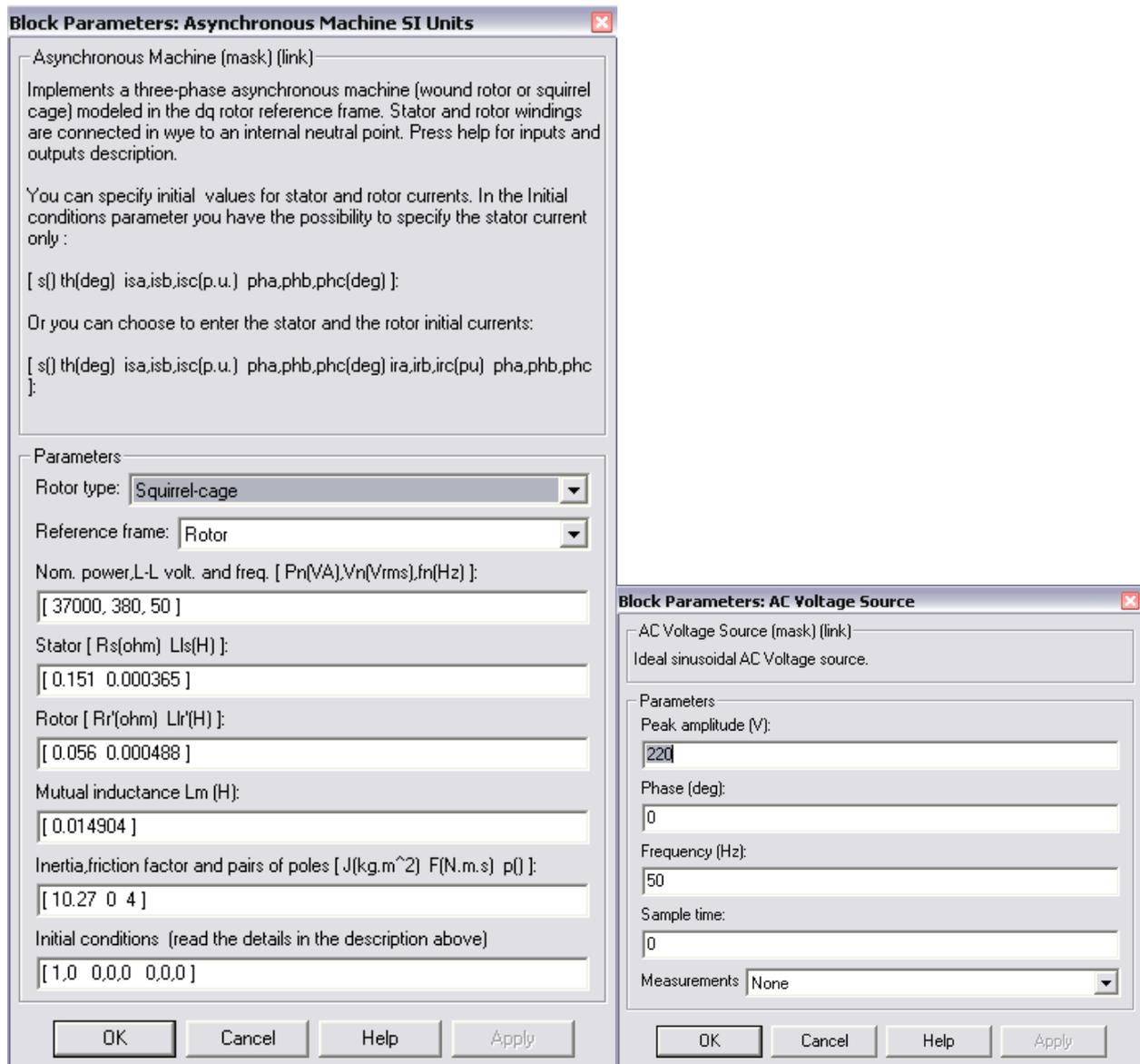


Рисунок 4 - Расчетные параметры блоков модели асинхронной машины

Подставляя параметры схемы замещения, рассчитанные выше, в блок модели асинхронного электродвигателя моделируем асинхронную электрическую машину в двигательном режиме.

Суммарный момент инерции принят $10.27 \text{ кг} \times \text{м}^2$, с учетом инерции предполагаемого исполнительного органа механизма.

На рисунках 5,6,7 приведены графики угловой скорости вала и электромагнитного момента, линейного напряжения сети и тока ротора, а также динамическая механическая характеристика двигателя.

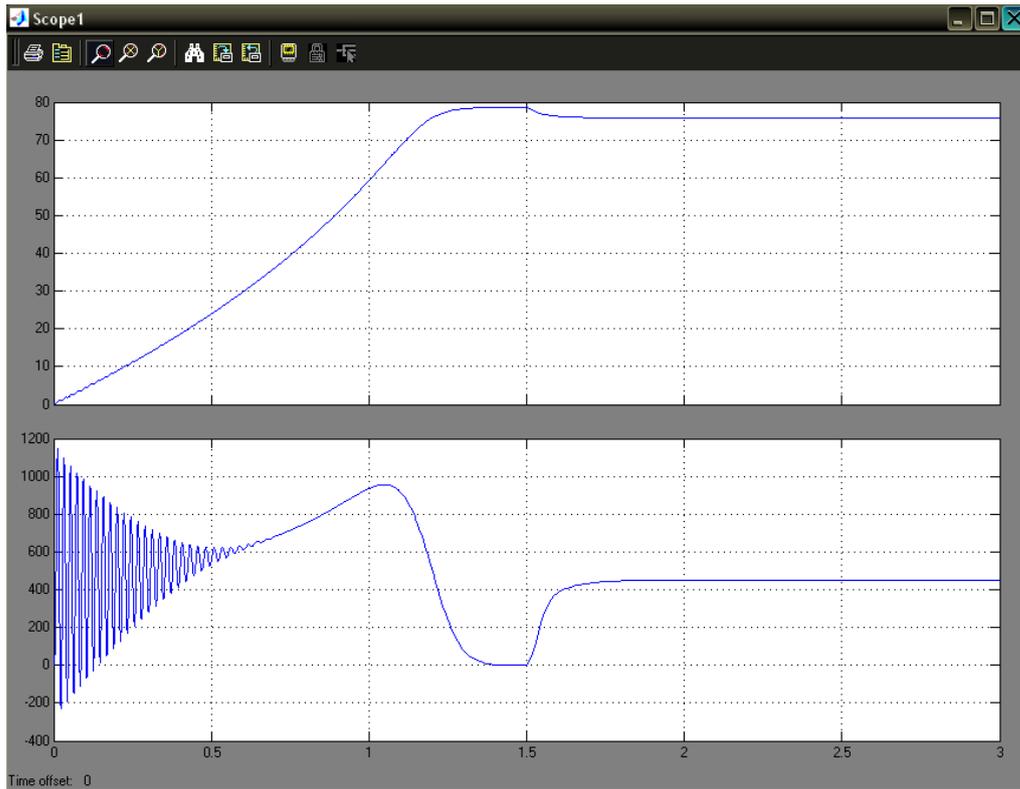


Рисунок 5 - Графики угловой скорости вала и электромагнитного момента

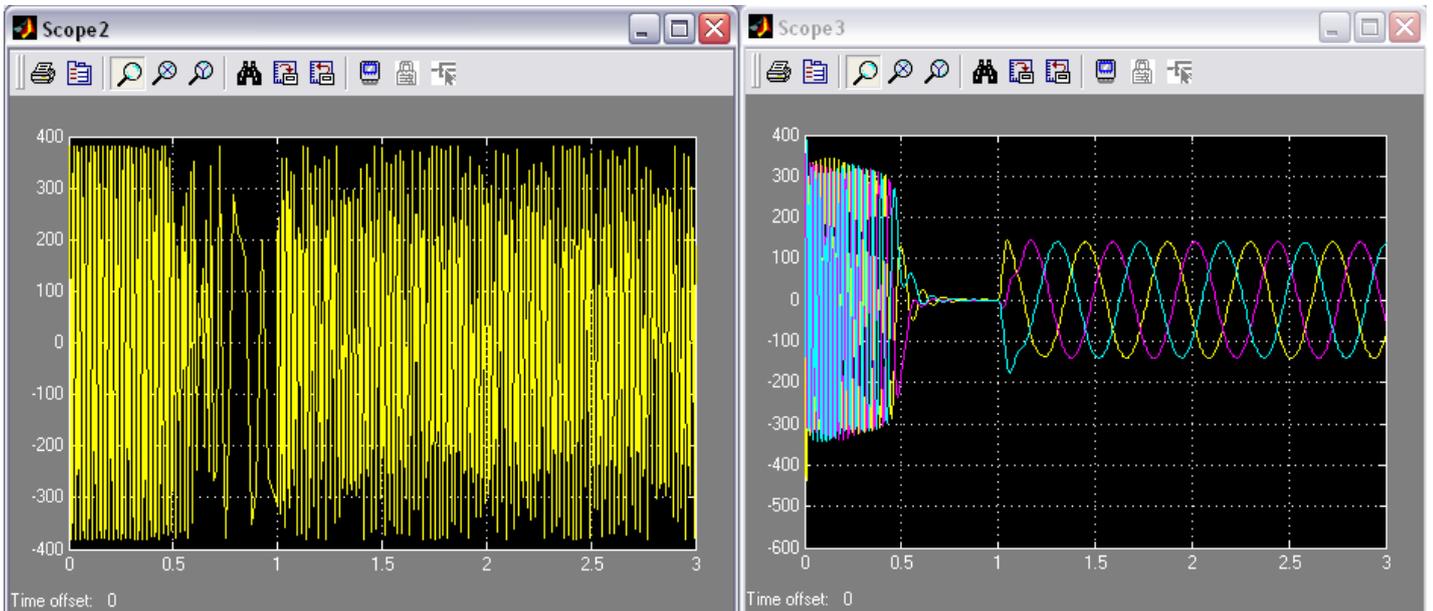


Рисунок 6 - Графики линейного напряжения сети и тока ротора

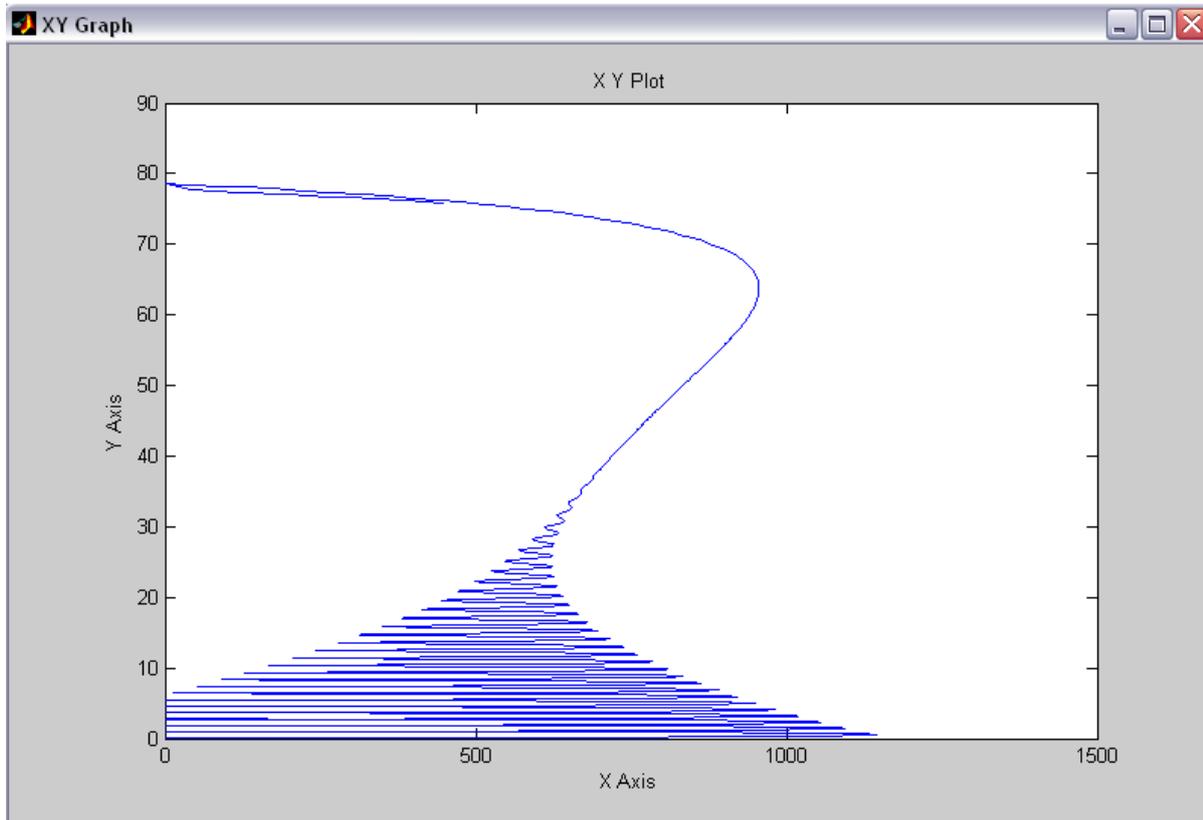


Рисунок 7 - Электромеханическая характеристика двигателя

Анализ полученных результатов.

3.2. Синтез замкнутой по скорости системы скалярного управления

3.2.1. Структура системы управления

Структура замкнутой по скорости системы скалярного управления асинхронным двигателем изображена на рис. 8. Объектом управления является асинхронный двигатель с управляемым преобразователем - преобразователем частоты. Статические и динамические свойства электропривода задаются путём настройки регулятора скорости. Датчик скорости выполняет функцию обратной связи. Поскольку в представленной системе отсутствует контур регулирования тока, для ограничения динамических нагрузок на время пуска используется задатчик интенсивности.

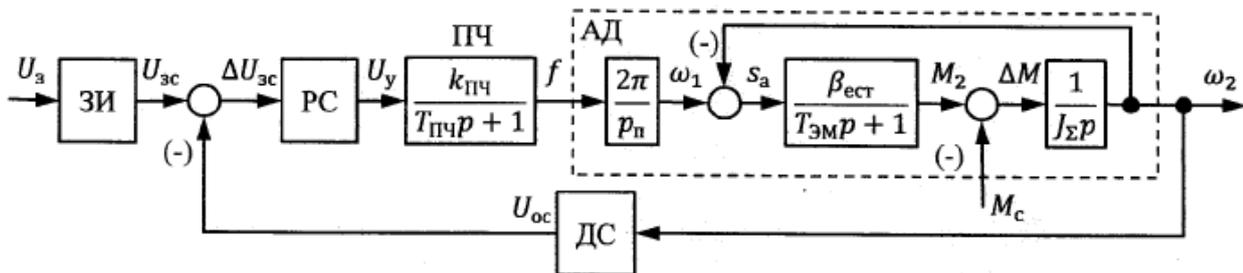


Рисунок 8 - Структурная схема замкнутой по скорости системы скалярного управления: ЗИ - задатчик интенсивности; РС - регулятор скорости; ПЧ - преобразователь частоты; АД - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; ДС - датчик скорости

Исходные данные

Исходными данными для синтеза системы управления являются параметры схемы замещения фазы асинхронного двигателя, которые определяются по справочнику или расчётным путём, его паспортные данные, параметры элементов силовой цепи, а также параметры системы управления (табл. 3).

Таблица 3 – исходные данные

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Диапазон изменения сигнала задания U_z	В	0...10
Диапазон изменения частоты питающего напряжения f	Гц	0...50
Время запаздывания процесса преобразования $T_{пр}$	с	0,001
Частота ШИМ $f_{ШИМ}$	Гц	4800
Индуктивность фильтра L_{ϕ}	Гн	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление фильтра R_{ϕ}	Ом	$6,8 \cdot 10^{-3}$
Дифференциальное сопротивление вентиля r_t	Ом	0,0033
Число пар полюсов асинхронной машины $p_{п}$	шт.	2
Скорость вращения магнитного поля статора номинальная $\omega_{1н}$	рад/с	157,08
Скорость вращения ротора номинальная $\omega_{2н}$	рад/с	153,94
Момент крутящий номинальный $M_{2н}$	Н·м	240,36
Кратность максимального (критического) момента m_k	о. е.	2,2
Скольжение критическое s_k	о. е.	0,083
Главная индуктивность фазы асинхронной машины L_m	мГн	23,903
Индуктивность рассеяния фазы статора $L_{1\sigma}$	мГн	2,64
Приведенная Индуктивность рассеяния фазы ротора $L_{2\sigma}$	мГн	1,163
Активное сопротивление фазы статора r_1	Ом	0,088
Активное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору r_2'	Ом	0,053
Момент инерции двигателя J_d	кг·м ²	0,15
Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя J_m	кг·м ²	0,225

Расчет параметров объекта управления

Преобразователь частоты представляет собой инерционное звено первого порядка (апериодическое). Передаточный коэффициент ПЧ можно вычислить как отношение максимальной выходной частоты к максимальному напряжению управления в статике ($p=0$). Тогда можно рассчитать его передаточный коэффициент:

$$k_{пч} = \frac{\max f}{\max U_y} = \frac{50}{10} = 5$$

Постоянная времени преобразователя частоты складывается из времени запаздывания процесса преобразования и периода несущей частоты (для данного преобразователя):

$$T_{пч} = T_{пр} + \frac{1}{f_{ШИМ}}$$

Асинхронный двигатель представляет собой несколько последовательно соединенных звеньев. Первое звено является пропорциональным и преобразует выходную частоту ПЧ в синхронную угловую скорость вращения (скорость вращения поля статора). Т.е. передаточный коэффициент обмотки статора:

$$k_c = \frac{2 \cdot \pi}{p_{п}}$$

Разницей между угловой скоростью вращения поля статора и ротора является угловая скорость роторной ЭДС или абсолютное значение скольжения. Поэтому β_{est} - модуль жесткости естественной статической зависимости вращающего момента двигателя от абсолютного скольжения. Эта зависимость имеет

нелинейный характер, т.е. жесткость есть величина переменная, но на рабочем участке характеристики ее можно принять постоянной (линеаризовать зависимость):

$$\beta_{est} = \frac{2 \cdot m_k \cdot M_H}{\omega_1 \cdot S_K}$$

Электромагнитная постоянная времени равна отношению суммарной индуктивности фазы системы к суммарному активному сопротивлению. Суммарная индуктивность складывается из индуктивностей фильтра, статора и ротора. В свою очередь индуктивности статора и ротора складываются из индуктивностей рассеяния и главной индуктивности фазы асинхронной машины. Таким образом:

$$L_{\Sigma} = L_{\phi} + L_{1\sigma} + L_{2\sigma} + 2 \cdot L_m$$

Для определения суммарного активного сопротивления необходимо вычислить коэффициент электромагнитной связи ротора:

$$k_2 = \frac{L_m}{L_{2\sigma} + L_m}$$

Тогда суммарное активное сопротивление фазы

$$R_{\Sigma} = r_T + R_{\phi} + r_1 + k_2^2 \cdot r_2'$$

Электромагнитная постоянная времени

$$T_{ЭМ} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$$

Суммарный момент инерции определяется суммой приведённого к валу двигателя момента инерции приводимого в движения механизма и момента инерции двигателя:

$$J_{\Sigma} = J_D + J_M$$

При отсутствии данных о механизме допускается принять приведённый к валу двигателя момент инерции механизма равным $1,5J_D$.

3.2.2. Синтез регулятора скорости

С учетом совершенных вычислений можно записать передаточную функцию асинхронного двигателя. При этом следует учитывать, что в состав структурной схемы АД входит замкнутый контур.

$$\begin{aligned} W_{АД}(p) &= \frac{2\pi}{p_n} \cdot \frac{\beta_{est}}{J_{\Sigma} p (T_{ЭМ} p + 1) \cdot \left(1 + \frac{\beta_{est}}{J_{\Sigma} p (T_{ЭМ} p + 1)} \right)} = \\ &= \frac{2\pi}{p_n} \cdot \frac{\beta_{est}}{J_{\Sigma} p (T_{ЭМ} p + 1) + \beta_{est}} = \frac{2\pi}{p_n} \cdot \frac{1}{T_M p (T_{ЭМ} p + 1) + 1} \end{aligned}$$

где механическая постоянная времени:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_{est}}$$

Объект регулирования состоит из преобразователя частоты и асинхронного двигателя, то есть

$$W_{ОРС}(p) = W_{ПЧ}(p) \cdot W_{АД}(p) = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ}p + 1} \cdot \frac{2\pi}{p_{п}} \cdot \frac{1}{T_{м}p(T_{ЭМ}p + 1) + 1}$$

Передаточный коэффициент обратной связи по скорости определяется из условия равенства напряжения обратной связи максимальному напряжению задания при заданной скорости вращения, которая принимается равной номинальной скорости вращения

$$k_{ДС} = \frac{\max U_3}{\omega_{2н}}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости имеет вид:

$$W_{ж.с.}(p) = \frac{1/k_{ДС}}{aT_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}$$

За некомпенсируемую постоянную времени T_{μ} принимается наименьшая постоянная времени контура регулирования (как правило, это постоянная времени преобразователя частоты). Для устранения статической ошибки регулирования в желаемую передаточную функцию разомкнутого контура регулирования вводится интегратор. Соотношение постоянной времени интегрирования и некомпенсируемой постоянной времени определяет безразмерный коэффициент a . При $a=2$ достигается наилучшее соотношение быстродействия контура и величины перерегулирования (настройка на «модульный оптимум»). Зная передаточную функцию объекта регулирования, находим передаточную функцию регулятора скорости:

$$\begin{aligned} W_{РС}(p) &= \frac{W_{ж.с.}(p)}{W_{ОРС}(p)} = \frac{1/k_{ДС}}{aT_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{2\pi k_{ПЧ}}{p_{п}(T_{ПЧ}p + 1)(T_{м}p(T_{ЭМ}p + 1) + 1)} = \\ &= \frac{T_{м}p_{п}}{2\pi a k_{ПЧ} k_{ДС} T_{ПЧ}} + \frac{p_{п}}{2\pi a k_{ПЧ} k_{ДС} T_{ПЧ} p} + \frac{T_{м} T_{ЭМ} p_{п}}{2\pi a k_{ПЧ} k_{ДС} T_{ПЧ}} p = \\ &= k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right). \end{aligned}$$

Таким образом, получена передаточная функция ПИД-регулятора, где

$$k_p = \frac{T_{м} \cdot p_{п}}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot k_{ПЧ} \cdot k_{ДС} \cdot T_{ПЧ}}$$

$$T_i = T_{\mu}$$

$$T_d = T_{ЭМ}$$

3.2.3. Расчет задатчика интенсивности

Для ограничения ускорения в переходных режимах и, следовательно, динамических нагрузок используются задатчики интенсивности. Задатчик интенсивности первого порядка преобразует скачкообразный сигнал на входе в линейно изменяющийся во времени с ограничением сигнал на выходе.

Для расчета времени пуска привода воспользуемся основным уравнением динамики дня вращательного движения:

$$M_2 - M_c = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon$$

где M_2 – вращающий момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления со стороны механизма, Н·м;

ε – ускорение привода, рад/с².

Решение этого уравнения должно удовлетворять следующему условию: вращающий момент двигателя не должен превышать предельное значение (в данном случае значение критического момента двигателя). Если заменить первую производную угловой скорости вращения вала двигателя по времени на соответствующее разностное отношение, что допускает линейная зависимость на выходе задатчика интенсивности, то, приняв момент сопротивления со стороны механизма равным номинальному моменту двигателя, можно найти минимально допустимое время пуска привода:

$$t_{\pi}^{min} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{2H}}{M_{пред} - M_c} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{2H}}{m_k \cdot M_{2H} - M_{2H}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{2H}}{(m_k - 1)M_{2H}}$$

Таким образом, получаем графики электромагнитного момента (рис. 9) тока ротора (рис. 10), и угловой скорости (рис. 11).

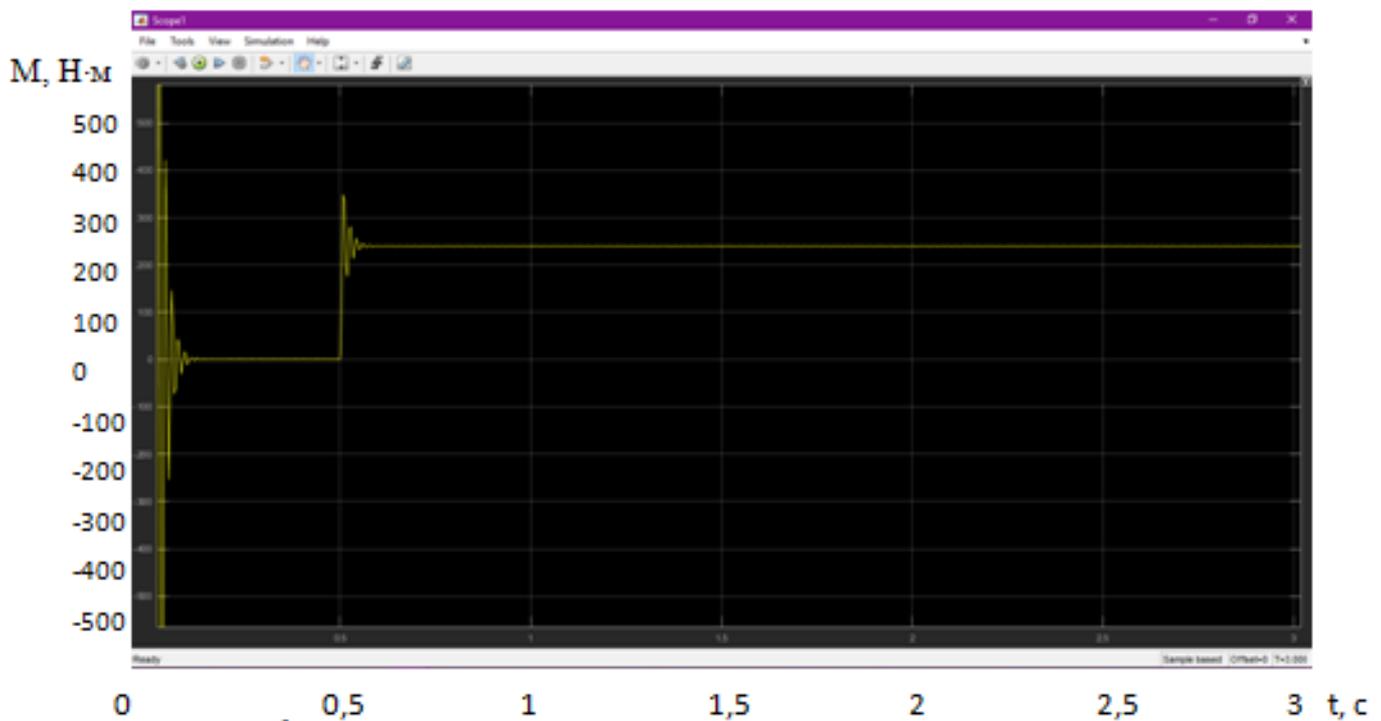


Рисунок 9 – График электромагнитного момента при скалярном управлении

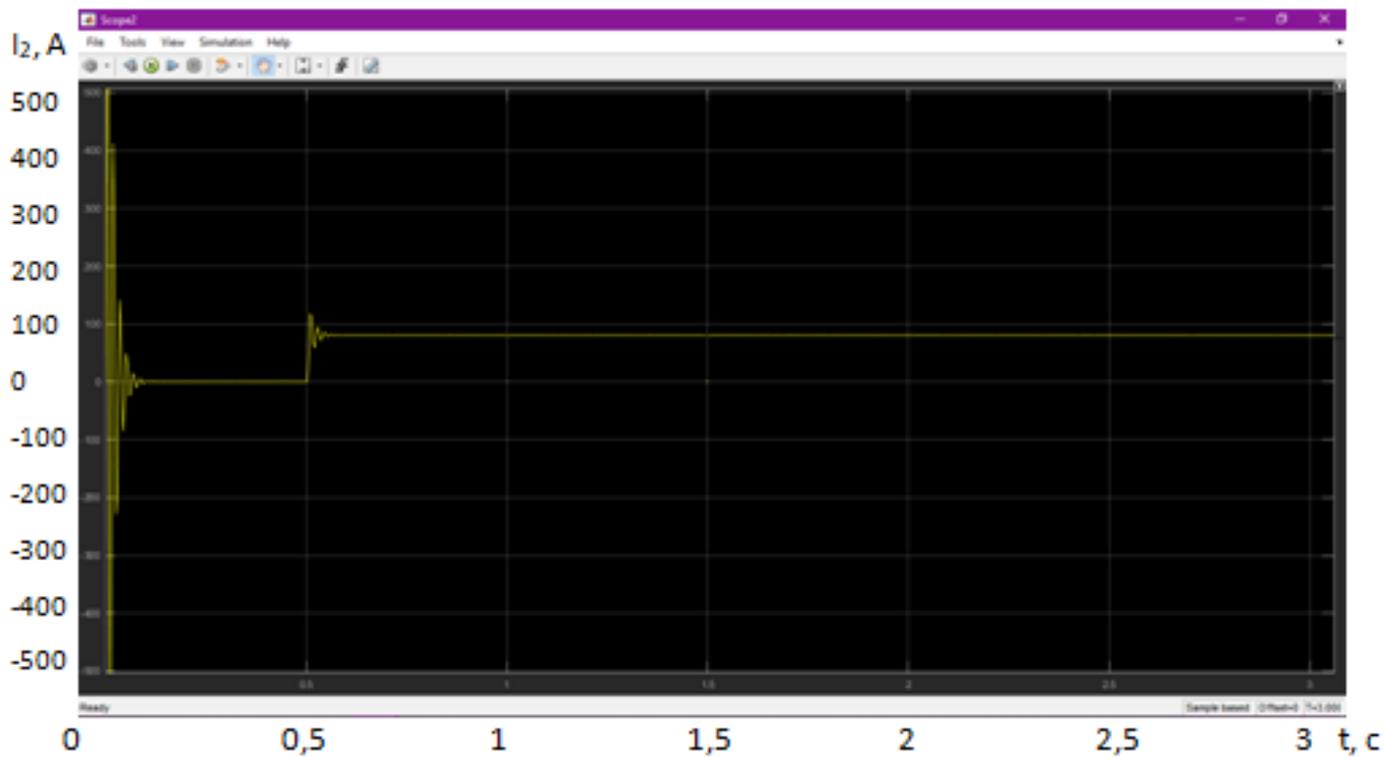


Рисунок 10 – график тока ротора при скалярном управлении

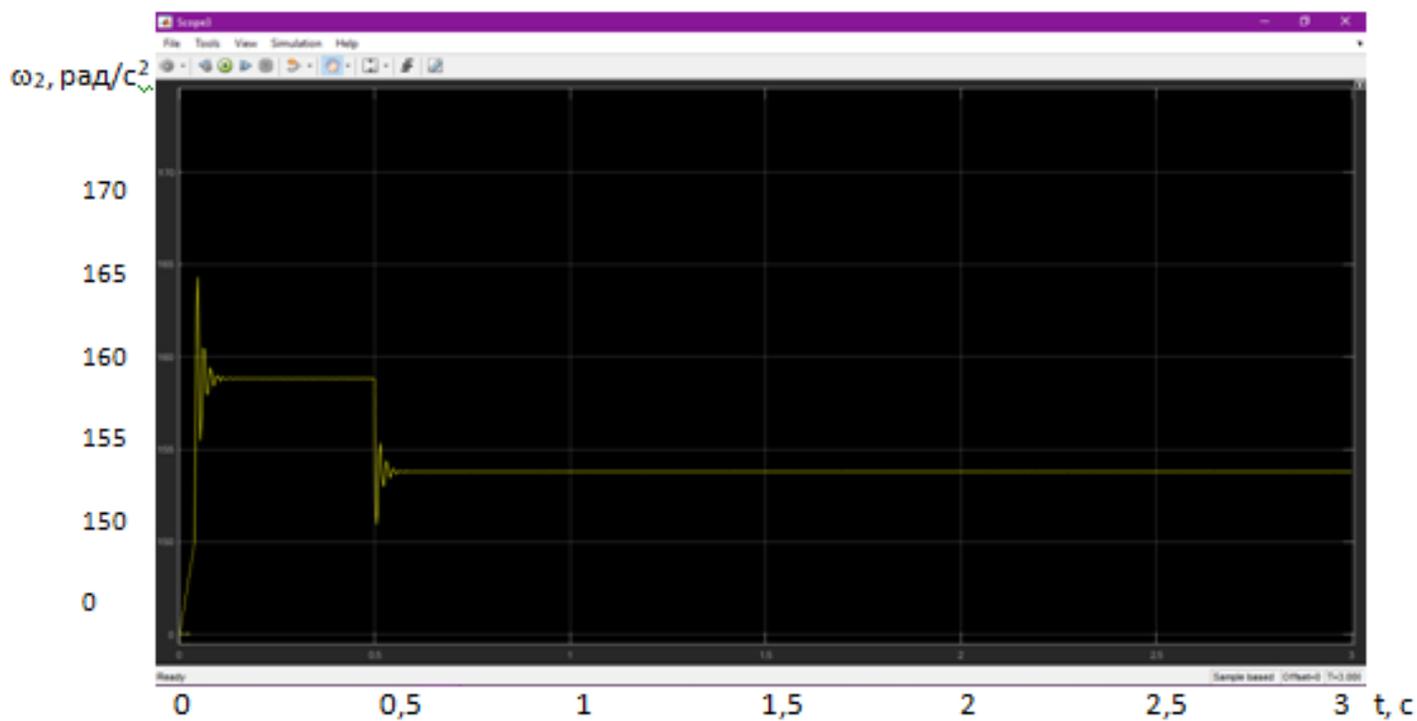


Рисунок 11 – график угловой скорости вала при скалярном управлении

3.3. Модель системы векторного управления

3.3.1. Расчет параметров асинхронного двигателя

Исходные данные

1.	Частота	$f_1 = 50$ Гц
2.	Число фаз	$m = 3$
3.	Мощность	$P_2 = 37000$ Вт
4.	Фазное напряжение	$U_{1H} = 220$ В
5.	Синхронная скорость базового АД	$n_1 = 1500$ об/мин
6.	КПД	$\eta = 0,92$
7.	Коэффициент мощности	$\cos\varphi = 0,87$
8.	X_m	$X_m = 2,4$
9.	Активное сопротивление обмотки статора	$R_1' = 0,028$
10.	Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора	$X_1' = 0,265$
11.	Приведенное активное сопротивление ротора	$R_2'' = 0,017$
12.	Приведенное индуктивное сопротивление ротора	$X_2'' = 0,117$

Фазный ток

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \text{КПД} \cdot \cos\varphi}$$

Параметры уточненной I-образной схемы замещения:

$$X_1 = 2 \cdot X_1' \cdot \frac{X_m}{X_m + \sqrt{X_m \cdot X_m + 4 \cdot X_1' \cdot X_m}} =$$
$$R_1 = R_1' \cdot \frac{X_1}{X_1'}$$

Коэффициент перевода относительных единиц в физические:

$$c = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}$$

Поправочный коэффициент для уточнения Г-образной схемы

$$b_k = \frac{X_1'}{X_1}$$

Основные параметры АД L_m , L_s , L_r (Гн), R_s , R_r (Ом)

$$x_m = X_m \cdot c \quad L_m = \frac{x_m}{\omega_0}$$

$$x_1 = X_1 \cdot c$$

$$x_2' = X_2'' \frac{c}{b_k^2}$$

$$L_s = \frac{(x_m + x_1)}{\omega_0}$$

$$X_2' = \frac{X_2''}{b_k^2}$$

$$L_r = \frac{(x_m + x_2')}{\omega_0}$$

$$r_1 = R_1 \cdot c$$

$$r_2' = R_2'' \frac{c}{b_k^2}$$

$$L_{\sigma r} = \frac{x_2'}{\omega_0}$$

$$L_s' = L_s - \left(\frac{L_m^2}{L_r} \right)$$

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}$$

$$L_r' = L_r - \left(\frac{L_m^2}{L_s} \right)$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}$$

3.3.2. Расчет параметров структурной схемы и регуляторов векторной САУ

Исходные данные

1.	Частота	$f_1 = 50$ Гц	
2.	Фазное напряжение	$U_{1H} = 220$ В	
3.	Фазный ток	$I_{1H} = 70,04$ А	
4.	Напряжение сети	$U_c = 380$ В	
5.	Момент инерции	$J_H = 2,98$ кг·м ²	
6.	Число пар полюсов	$p = 2$	
7.	Угловая скорость вращения	$\omega_0 = 314,16$ рад/с	
8.	Угловая скорость вращения магнитного поля	$\omega_c = 157,08$	
9.	Номинальная угловая скорость вращения вала	$\omega_H = 153,94$	
10.	Активное сопротивление фазы статора r_1	$r_1 = 0,08$	
11.	Приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора r'_2 ,	$r'_2 = 0,044$	
12.	Приведенная индуктивность рассеяния фазы статора L'_s	$L'_s = 0,0033$	
13.	индуктивность рассеяния фазы ротора L_r	$L_r = 0,0032$	
	$k_s = 0,909$	$k_r = 0,961$	
	$\sigma_s = 1 - k_s = 0,091$	$\sigma_r = 1 - k_r = 0,039$	$\sigma = 1 - k_s \cdot k_r = 0,126$

Коэффициент передачи (В/В) и постоянная времени (с) ТПЧ:

$$K_{um} = \frac{1,414 \cdot U_{1H}}{10} \quad T_m =$$

Главное потокосцепление, Вб:

$$\Psi = \frac{U_{1H}}{4,44 \cdot f_1}$$

Датчики сигналов ОС

$$K_{d\psi} = \frac{10}{\Psi}$$

$$K_{di} = \frac{1}{I_{1H}}$$

$$K_{\omega} = \frac{10}{\omega_H}$$

3.3.3. Расчет параметров структурной схемы САУ

$$T_{\psi} = \sigma \cdot \frac{L_r}{r_2' \cdot \sigma_s}$$

$$k_{\psi} = k_s \cdot \frac{L_r}{r_2'}$$

$$C_m = 1,5 \cdot p =$$

$$T_i = \frac{L_s'}{r_1 + k_r \cdot r_2'}$$

$$k_i = \frac{1}{r_1 + k_r \cdot r_2'}$$

3.3.4. Регуляторы векторной САУ.

Канал потока: ПИ-регулятор потока.

$$K_2 = \frac{1}{2 \cdot T_m \cdot k_{\psi} \cdot K_{um} \cdot K_{d\psi}}$$

$$K_1 = K_2 \cdot T_{\psi}$$

$$\frac{K_1}{K_2} =$$

$$\frac{1}{K_2} =$$

Канал скорости: ПИ-регулятор тока i_2 .

$$\Delta T = T_i - T_m = 0,0273 - 0,001 = 0,0263$$

$$T_a = 0,001$$

$$T_t = 2 \cdot T_a = 0,002$$

$$T_b = 0,0273$$

$$K_4 = \frac{1}{2 \cdot T_a \cdot k_i \cdot K_{um} \cdot K_{di}}$$

$$K_3 = K_4 \cdot T_b$$

$$\frac{K_3}{K_4} =$$

$$\frac{1}{K_4} =$$

Расчет П-регулятора скорости по техническому оптимуму.

$$K_{r\omega} = J_{\Pi} \cdot \frac{K_{di}}{4 \cdot C_m \cdot \Psi \cdot K_{\omega} \cdot T_a} =$$

Расчет ПИ-регулятора скорости по техническому оптимуму.

$$K_m = C_m \cdot \Psi \cdot \frac{K_\omega}{K_{di}} =$$
$$T_{em} = J_\Pi \cdot \frac{1}{C_m^2 \cdot \Psi^2 \cdot k_i} =$$
$$K_6 = \frac{J_\Pi}{4 \cdot T_a \cdot K_m \cdot T_{em}} =$$
$$\frac{1}{K_6} =$$
$$K_5 = K_6 \cdot T_{em} =$$
$$\frac{K_5}{K_6} =$$

Расчет ПИ-регулятора скорости по симметричному оптимуму.

$$K_{6s} = \frac{J_\Pi}{32 \cdot T_a^2 \cdot K_m} =$$
$$\frac{1}{K_{6s}} =$$
$$K_{5s} = K_{6s} \cdot (4 \cdot T_t) =$$
$$\frac{K_{5s}}{K_{6s}} =$$

3.3.5. Определение параметров схемы замещения по паспортным данным АД

Исходные данные

1.	Частота	$f_1 = 50$ Гц
2.	Число фаз	$m = 3$
3.	Мощность	$P_2 = 37000$ Вт
4.	Фазное напряжение	$U_{1H} = 220$ В
5.	Напряжение сети	$U_s = 380$ В
6.	Синхронная скорость АД	$n_1 = 1500$ об/мин
7.	Номинальная скорость	$n_2 = 1470$ об/мин
8.	Число пар полюсов	$p = 2$
9.	КПД	$\eta = 0,92$

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| 10. Коэффициент мощности | $\cos\varphi = 0,87$ |
| 11. Кратность пускового тока | $i_k = 7,0$ |
| 12. Кратность пускового момента | $m_k = 2,3$ |

Фазный ток:

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \text{кпд} \cdot \cos\varphi} =$$

$$s_H = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} =$$

$$s_k = \left[m_k + \sqrt{m_k^2 + 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1) - 1} \right] \cdot s_n \cdot [1 - 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1)]^{-1} =$$

Коэффициент $b_k = 1 + s_n =$

Механические потери:

$$\Delta P_m = [U_c \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{1H}) \cdot \cos\varphi - P_2] \cdot \left(1 + \frac{n_1^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05 =$$

$$r_s = 3 \cdot \left(\frac{U_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{(1 - s_H)}{2 \cdot b_k \cdot \left(1 + \frac{b_k}{s_k} \right) \cdot m_k \cdot (P_2 - \Delta P_m)} =$$

$$r_r = \frac{P_2 + \Delta P_m}{3 \cdot (1 - s_H) \cdot i_k^2 \cdot I_{1H}^2} =$$

$$L_s = \frac{U_s}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_{1H} \cdot \left[\sqrt{1 - \cos^2\varphi} - \cos\varphi \cdot \frac{s_H}{s_k} \right]} =$$

$$L_{\sigma s} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_s}{i_k \cdot I_{1H} \cdot \sqrt{3}} \right)^2 - (r_r + r_s)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} =$$

$$L_m = L_s - L_{\sigma s} =$$

$$L'_s = L_s - \left(\frac{L_m^2}{L_r} \right) =$$

Таким образом, структурная схема ПЧ – АД имеет следующий вид (рис. 12).

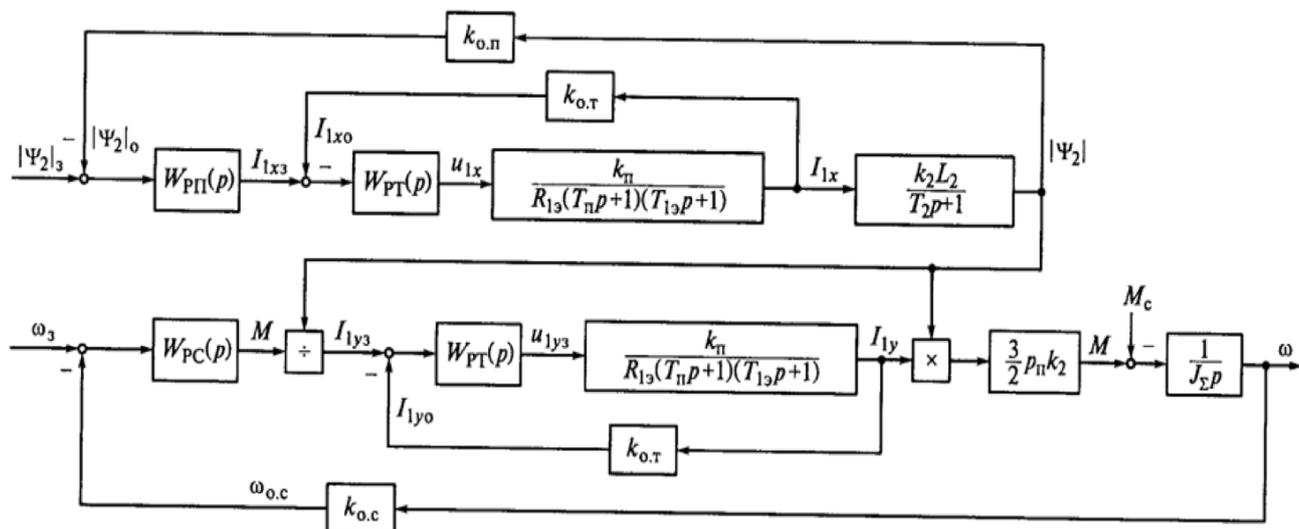


Рисунок 12 - Структурная схема замкнутой системы ПЧ-АД при ориентации координат x и y по потокосцеплению ротора

4 Рекомендуемая литература

4.1 Основная литература

1. Электропривод типовых производственных механизмов : учебное пособие для вузов / Ю. Н. Дементьев, В. М. Завьялов, Н. В. Кояин, Л. С. Удуг. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 403 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-06847-4. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/index.php/bcode/442084> (дата обращения: 10.02.2020).
2. Электрический привод : учебник / В.В. Москаленко. — М. : ИНФРА-М, 2019. — 364 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — www.dx.doi.org/10.12737/4557. - URL: <http://znanium.com/catalog/product/1001814> (дата обращения 10.02.2020).
3. Силовая электроника: учебник для вузов/Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий А.А. Кваснюк. — 2-е изд., стереотип. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 632 с.: ил. — ISBN 978-5-383-00403-6. URL: <https://b-ok2.org/book/2939127/9c2d20> (дата обращения: 10.02.2020).
4. Фролов, Ю.М. Проектирование электропривода промышленных механизмов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2014. — 447 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=44766 (10.02.2020).
5. Никитенко, Г.В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Г.В. Никитенко ; ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет». - Ставрополь : Агрус, 2012. - 240 с. : ил., табл., схем. - Библиогр. в кн.. - ISBN 978-5-9596-0778-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277520> (10.02.2020).

4.2 Дополнительная литература

1. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учеб. для студентов вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. - 3-е изд., испр. - М. : Академия, 2007. - 574, [1] с. : ил. - ISBN 5-7695-1314-4; Библиотека НЧОУ ВО «Технический университет УГМК».
2. Ильинский, Н. Ф. Электропривод : энерго- и ресурсосбережение: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. - Москва: Академия, 2008. - 201, [1]с. : ил. - ISBN 978-5-7695-2849-1; Библиотека НЧОУ ВО «Технический университет УГМК».
3. Васильев, К.А. Транспортные машины и оборудование шахт и рудников [Электронный ресурс] : учебное пособие / К.А. Васильев, А.К. Николаев, К.Г. Сазонов. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 538 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2770 (17.02.2016).

Приложение № 1
к Методическим рекомендациям
по выполнению курсового проекта
по дисциплине Детали машин и
основы проектирования

**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»**

**Задание
на курсовой проект**

по дисциплине _____

студента _____ группы _____

направление подготовки _____

1. Тема курсового проекта _____

2. Содержание (индивидуальное задание) курсового проекта, в том числе состав
графических работ и расчетов _____

3. Структура работы _____

4. График работы _____

Наименование элементов проектной работы	Сроки	Примечания	Отметка о выполнении

Руководитель _____ /И.О. Фамилия/

Приложение № 2
к Методическим рекомендациям
по выполнению курсового проекта
по дисциплине Детали машин и
основы проектирования



**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»**

Кафедра _____ *

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине « _____ »

Тема _____

Студент (ка) _____
ФИО

Группа _____

Руководитель _____
ФИО

ученая степень, ученое звание

оценка _____ подпись _____

Дата сдачи _____ 20__ г.

г. Верхняя Пышма
20__ г.

*На титульном листе указывается название кафедры, за которой закреплена данная дисциплина.

Приложение № 3

к Методическим рекомендациям
по выполнению курсового проекта
по дисциплине Детали машин и
основы проектирования

**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»**

РЕЦЕНЗИЯ
на курсовой проект

Студента _____ группы _____
(фамилия имя отчество)

Тема курсового проекта:

Дисциплина _____

1. Соответствие результатов выполнения работы целям и задачам курсового проекта,
результатам обучения по дисциплине _____

2. Оригинальность и самостоятельность выполнения работы _____

3. Полнота и глубина проработки разделов _____

4. Общая грамотность и качество оформления текстового документа и графических
материалов _____

5. Вопросы и замечания _____

6. Общая оценка работы _____

Сведения о рецензенте:

Ф.И.О. _____

Уч. звание _____ Уч. степень _____

Дата _____ 20__ г.

_____ И.О. Фамилия
подпись