



Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»
Кафедра энергетики

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Электрический привод»

Направление
подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль
подготовки

«Электрооборудование и электрохозяйство горных и
промышленных предприятий»

Уровень высшего
образования

бакалавриат

(бакалавриат, специалитет, магистратура)

Группа: Эн-17203

Преподаватель: Дегтярёв Е.А.
(ФИО)

г. Верхняя Пышма
2019 г.

ЗАДАНИЕ

для выполнения курсового проекта
по дисциплине «Электрический привод»

Система электропривода объекта, проектируемая в курсовом проекте (КП), должна быть выполнена в ключе утвержденного индивидуального задания студента на выпускную квалификационную работу бакалавра. При этом структуру разделов КП, приведенную в настоящих указаниях, требуется соблюдать.

Объект проектирования должен быть выбран из числа электроприемников, участвующих в расчете курсового проекта «Электрооборудование и электрохозяйство горных и промышленных предприятий»:

- электропривод напряжением до 1000 В, если в специальной части задания на ВКРБ прорабатывалась система внутреннего электроснабжения цеха (участка);
- электропривод напряжением выше 1000 В, если в специальной части задания на ВКРБ прорабатывалась система внешнего электроснабжения цеха (участка).

Данный курсовой проект является продолжением ранее выполненной работы по дисциплине «Теория электропривода».

В случае соответствия объекта тематике выпускной работы полученные ранее результаты следует принять за основу для выполнения КП. иначе расчеты следует повторить.

Содержание КП

1. Раздел. Выбор и обоснование модернизации электропривода
 - 1.1. Назначение приводного механизма и его технические характеристики.
 - 1.2. Назначение и требования к электроприводу, его номинальные параметры.
 - 1.3. Обоснование целесообразности модернизации электропривода.
2. Раздел. Выбор системы электропривода и мощности электродвигателя
 - 2.1. Разработка силовой схемы электропривода, выбор электродвигателя и преобразовательного устройства.
 - 2.2. Расчёт механических и электромеханических характеристик приводного двигателя.

3. Синтез математической модели электродвигателя и анализ полученных результатов
4. Синтез системы управления
 - 4.1. Расчет параметров объекта управления
 - 4.2. Синтез передаточных функций модели
 - 4.3. Построение модели в программе Matlab Simulink, анализ полученных результатов
5. Построение электрической принципиальной схемы управления, описание система защит электропривода.
6. Заключение.

Литература

Основная

3. 3. Никитенко Г. В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие [Электронный ресурс] / Ставрополь: Агрус, 2012. - 240с. - 978-5-9596-0778-4 — Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=277520 — Загл. с экрана.
4. 4. Электрический привод и электрооборудование в АПК, Ч. 2. Регулирование двигателя постоянного тока [Электронный ресурс] / Новосибирск: ИЦ «Золотой колос», 2014. - 68с. — Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=278156 — Загл. с экрана.

Дополнительная

1. Алексеев В. В., Козярук А. Е., Загривный Э. А. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования. – СПб, 2006. - 58 с.
2. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. – Академия, 2005 – 300 с.

1. Расчет параметров модели системы векторного управления

1. Общие сведения

Расчет выполняют по приложениям 2 и 3 [1]. В приложениях приведен пример расчета параметров Т-образной схемы замещения электродвигателя (приложение 3), и передаточных функций модели системы векторного управления (приложение 2) на примере электродвигателя мощностью 75 кВт 980 об/мин.

Полный набор формул и пример структурной схемы модели содержатся также в [2], но в источнике отсутствует изложение последовательности расчета.

2. Расчет параметров Т-образной схемы замещения электродвигателя (приложение 3)

Расчет начинают с заполнения таблицы паспортных данных двигателя из каталога на асинхронный электродвигатель (пункты 1...10 в приложении 3).

Синхронную скорость $n1$ выбирают из ряда 3000, 1500, 1000, 750 и т.д. оборотов в минуту как величину, наиболее близкую к номинальной частоте вращения $n2$, или определяют через угловую скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость) $f1$ и число пар полюсов p как

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Определяют параметры схемы замещения по расчетным формулам в п. 11. В примере обозначено:

s_n – номинальное скольжение [о. е.], s_k – критическое скольжение [о. е.], ΔP_m – механические потери в двигателе, [Вт], r_r – приведенное активное сопротивление ротора [Ом], r_s – активное сопротивление статора [Ом] (мощности подставлять в ваттах), L_s, L_r – индуктивность статора и ротора [Гн], $L_{\sigma s}$ – приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора [Гн], L_m – индуктивность цепи намагничивания [Гн].

Указания. Значение ΔP_m можно не рассчитывать по формуле, а принять $\Delta P_m = 0,01P_{ном}$.

3. Расчет параметров передаточных функций модели системы векторного управления (приложение 2)

1. Определяют параметры двигателя, перечисленные в п. 1.

Момент инерции привода находят по формуле

$$J_n = J_{dv} + J'_{mex},$$

где J_{dv}, J'_{mex} – моменты инерции ротора двигателя (приведен в каталоге), и приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

Параметр p_0 – число пар полюсов.

Определяют номинальную угловую скорость вращения вала

$$\Omega = \omega_n = \frac{\pi n_2}{30}.$$

Учитывают, что $r'_2 = r_r, r_1 = r_s$. В примере значения взяты не из расчета по приложению 3, а из справочника.

$$\text{Вычисляют } k_s = \frac{L_m}{L_s}, k_r = \frac{L_m}{L_r}.$$

Коэффициент передачи датчика тока определяют как $k_{di} = \frac{10}{I_{1n}}$. В примере ошибка в формуле!

Постоянные времени в формулах расчета параметров ПИ-регулятора тока зависят от разности ΔT . Запись $T_a := if(\Delta T > 0, T_m, T_1)$ означает, что если $\Delta T > 0$, то $T_a = T_m$, иначе $T_a = T_1$. Здесь использована нотация оператора условного перехода языка программирования высокого уровня Фортран.

4. Построение модели в программе Матлаб Симулинк (Matlab Simulink)

Модель системы векторного управления представлена на рисунке в приложении. Модель приведена в абсолютных единицах.

В модели нужно изменить:

1) значение коэффициента пропорциональности между током и моментом с учетом потокосцепления и определить C_m по формуле

$$C_m = \frac{M_n}{(I_{1n} \cdot \psi_0)}, M_n = \frac{P_2}{\omega_{dn}},$$

2) момент сил сопротивления в блоке *Step* в нижней части модели, в котором значение $Final=750$ кНм, вместо которого подставить номинальный момент, вычисленный по формуле $M_n = \frac{P_2}{\omega_{dn}}$.

5. Проверка работоспособности модели

Проверку выполняют, сравнивая установившиеся значения потокосцепления Psi , проекции I_2 тока статора на ось u , момента на валу двигателя Te и угловой частоты вращения вала двигателя ω с рассчитанными номинальными значениями.

Расчет параметров структурной схемы и регуляторов векторной САУ

1. Исходные данные

$$f_1 := 50 \text{ Гц} \quad U_{1n} := 220 \text{ В} \quad I_{1n} := 138 \text{ А} \quad U_s := 380 \text{ В} \quad J_n := 2.98 \text{ км}^2$$

$$p_0 := 3 \quad w_0 := 314.16 \quad \Omega := 104.72 \text{ Номинальная скорость } W_{dn} := 102.52 \text{ рад/с}$$

$$r_2 := 0.03147 \quad r_1 := 0.04946 \text{ Ом} \quad L_r := 0.0194 \text{ Л'с} := 0.00119 \text{ Гн} \quad k_s := 0.9651 \quad k_r := 0.968$$

$$\sigma_s := 1 - k_s \quad \sigma_r := 1 - k_r \quad \sigma := 1 - k_s \cdot k_r \quad \sigma_s = 0.0349 \quad \sigma_r = 0.032 \quad \sigma = 0.06578$$

Коэфф. передачи (В/В) и постоянная времени (с) ТПЧ: $K_{um} := \frac{1.414 \cdot U_{1n}}{10} \quad T_m := 0.001$

Главное потокоцепление, Вб $\Psi := \frac{U_{1n}}{4.44 \cdot f_1} \quad \Psi_0 := \Psi \quad \Psi_0 = 0.99099 \quad K_{um} = 31.108$

Датчики сигналов ОС

$$K_{di} := \frac{1}{I_{1n}} \text{ В/А} \quad K_{di} = 0.00725 \quad K_w := \frac{10}{W_{dn}} \text{ В*с} \quad K_w = 0.09754 \quad K_{d\Psi} := \frac{10}{\Psi_0} \text{ В/Вб} \quad K_{d\Psi} = 10.09091$$

2. Расчет параметров структурной схемы САУ

$$T_\Psi := (1 - k_s \cdot k_r) \cdot \frac{L_r}{r_2 \cdot (1 - k_s)} \quad k_\Psi := k_s \cdot \frac{L_r}{r_2} \quad T_\Psi = 1.16197 \quad k_\Psi = 0.59495 \quad C_m := 1.5 \cdot p_0$$

$$T_i := \frac{L's}{r_1 + k_r \cdot r_2} \quad k_i := \frac{1}{r_1 + k_r \cdot r_2} \quad T_i = 0.01489 \quad k_i = 12.51205 \quad C_m = 4.5$$

3. Регуляторы векторной САУ. Канал потока: ПИ-регулятор потока

$$K_2 := \frac{1}{2 \cdot T_m \cdot k_\Psi \cdot K_{um} \cdot K_{d\Psi}} \quad K_1 := K_2 \cdot T_\Psi \quad \frac{1}{K_2} = 0.37352 \quad \frac{K_1}{K_2} = 1.16197$$

Канал скорости: ПИ-регулятор тока i2

$$T_i = 0.01489 \quad T_m := 0.001 \quad \Delta T := T_i - T_m \quad \Delta T = 0.01389$$

$$T_a := \text{if}(\Delta T > 0, T_m, T_i) \quad T_b := \text{if}(\Delta T > 0, T_i, T_m) \quad T_t := 2 \cdot T_a$$

$$K_4 := \frac{1}{2 \cdot T_a \cdot k_i \cdot K_{um} \cdot K_{di}} \quad K_3 := K_4 \cdot T_b \quad \frac{1}{K_4} = 0.00564 \quad \frac{K_3}{K_4} = 0.01489$$

Расчет ПИ-регулятора скорости по техническому оптимуму

$$K_{rw} := J_n \cdot \frac{K_{di}}{4 C_m \cdot \Psi_0 \cdot K_w \cdot T_a} \quad K_{rw} = 12.41091$$

Расчет ПИ-регулятора скорости по техническому оптимуму

$$K_m := C_m \cdot \Psi_0 \cdot \frac{K_w}{K_{di}} \quad K_m = 60.02784 \quad T_{em} := J_n \cdot \frac{1}{C_m \cdot C_m \cdot \Psi_0 \cdot \Psi_0 \cdot k_i} \quad T_{em} = 0.01198$$

$$K_6 := \frac{J_n}{4 \cdot T_a \cdot K_m \cdot T_{em}} \quad K_5 := K_6 \cdot T_{em} \quad \frac{K_5}{K_6} = 0.01198 \quad \frac{1}{K_6} = 0.00096$$

Расчет ПИ-регулятора скорости по симметричному оптимуму

$$K_{6s} := \frac{J_n}{32 \cdot T_a^2 \cdot K_m} \quad K_{5s} := K_{6s} \cdot (4 \cdot T_t) \quad \frac{K_{5s}}{K_{6s}} = 0.008 \quad \frac{1}{K_{6s}} = 0.00064$$

5.

Определение параметров схемы замещения по паспортным данным АД

Исходные данные

- | | |
|--|--|
| 1. Частота, Гц (50): | $f_1 := 50$ |
| 2. Число фаз: | $m := 3$ |
| 3. Мощность, Вт (75000): | $P_2 := 75000$ |
| 4. Фазное напряжение, В: | $U_{1n} := 220$ |
| 5. Линейное напряжение, В: | $U_s := 380$ |
| 6. Синхронная скорость АД, об/мин: | $n_1 := 1000$ |
| 7. Номинальная скорость, об/мин: | $n_2 := 980$ |
| 8. Число пар полюсов | $p_0 := 3$ |
| 9. КПД (η) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$): | $\eta := 0.91 \quad \cos \varphi := 0.9$ |
| 10. Кратность пускового тока i_k и момента m_k | $i_k := 7 \quad m_k := 2.1$ |

11. Фазный ток, А: $I_{1n} := \frac{P_2}{m \cdot U_{1n} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad I_{1n} = 138.75014$

$$s_n := \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad s_n = 0.02$$

$$s_k := \left[m_k + \sqrt{m_k^2 + 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1) - 1} \right] \cdot s_n \cdot \left[1 - 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1) \right]^{-1} \quad s_k = 0.08281$$

Коэффициент $b_k = (L_{\sigma S} / L_m) + 1 = 1.01 - 1.06$. Примерно
 Механические потери, Вт $b_k := 1 + s_n \quad b_k = 1.02$

$$\Delta P_m := \left[U_s \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{1n}) \cdot \cos \varphi - P_2 \right] \cdot \left(1 + \frac{n_1^2}{1000^2} \right)^{-1} \cdot 0.05 \quad \Delta P_m = 719.02231 \quad \text{Вт}$$

$$r_s := 3 \cdot \left(\frac{U_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{(1 - s_n)}{2 \cdot b_k \cdot \left(1 + \frac{b_k}{s_k} \right) \cdot m_k \cdot (P_2 + \Delta P_m)} \quad r_s = 0.03276 \quad \text{Ом}$$

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

$$L_s := \frac{U_s}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_{1n} \cdot \left[\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \cos \varphi \cdot \frac{(s_n)}{s_k} \right]} \quad r_r = 0.0273 \quad \text{Ом}$$

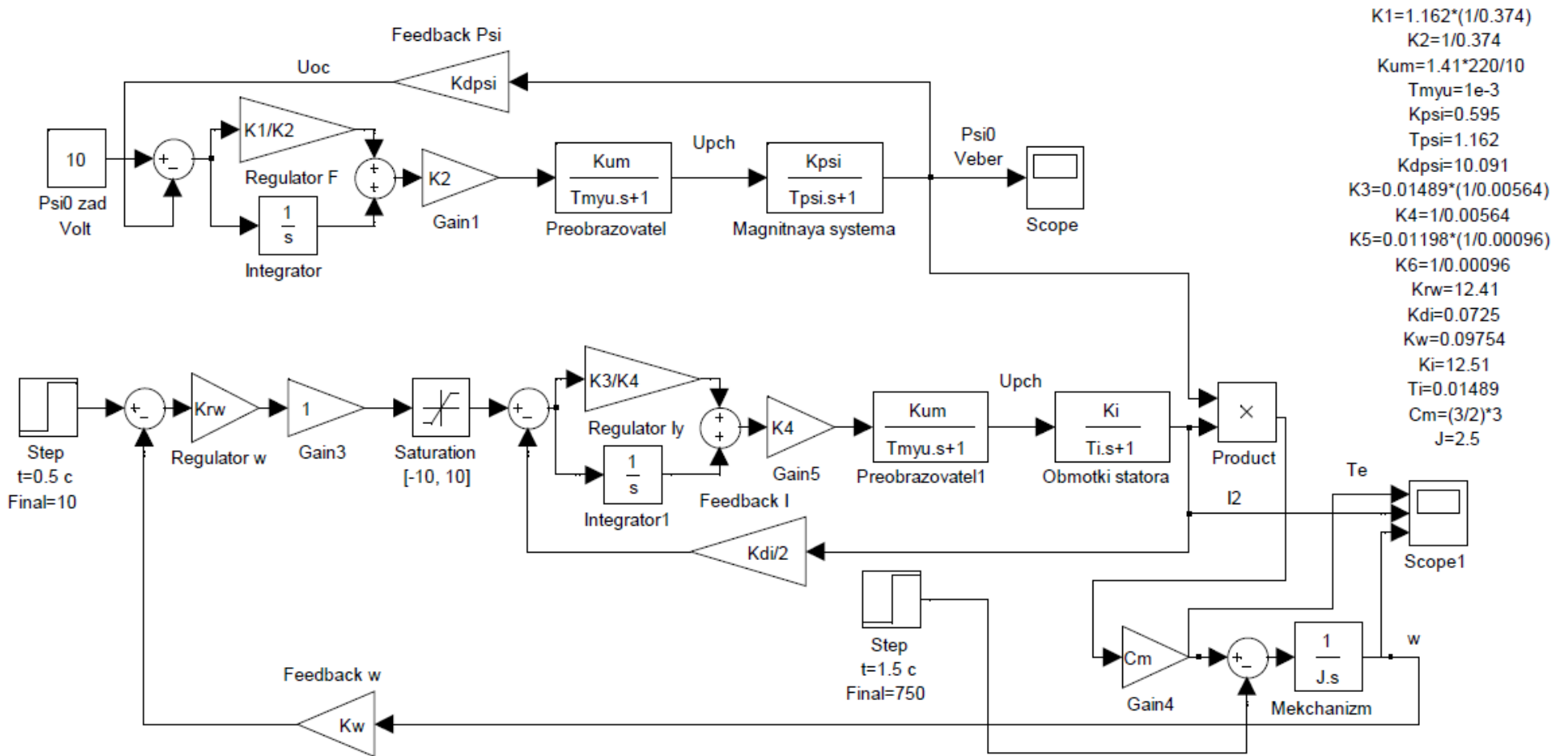
$$L_s = 0.02303 \quad \text{Гн}$$

$$L_{\sigma S} := \frac{\sqrt{\left(\frac{U_s}{i_k \cdot I_{1n} \cdot \sqrt{3}} \right)^2 - (r_r + r_s)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad L_r := L_s$$

$$L_{\sigma S} = 0.00069 \quad \text{Гн}$$

$$L_m := L_s - L_{\sigma S} \quad L'_s := L_s - \left(L_m \cdot \frac{L_m}{L_r} \right) \quad L_m = 0.02234 \quad L'_s = 0.00137 \quad \text{Гн}$$

6.



1 Расчет параметров полной математической модели электродвигателя

Паспортные характеристики двигателя

Таблица №1

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.

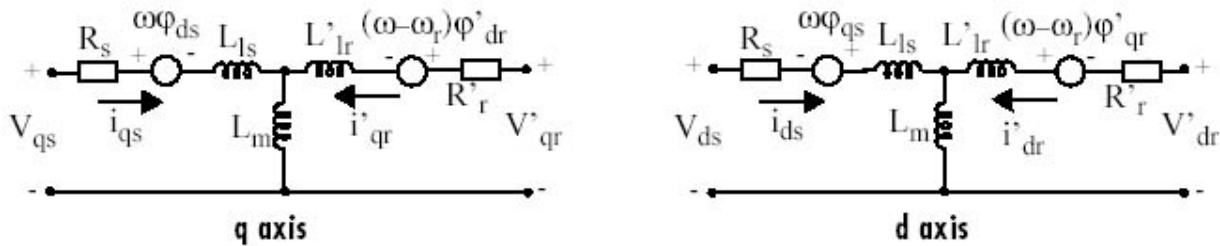


Рис. 1. Схема замещения асинхронной машины в двухфазной системе координат.

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), с⁻¹

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

Номинальная угловая скорость вращения вала, с⁻¹

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

Номинальный момент, Н*м

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

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

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

Коэффициент приведения

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

Приведенное активное сопротивление ротора, Ом

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

Активное сопротивление статора, Ом

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

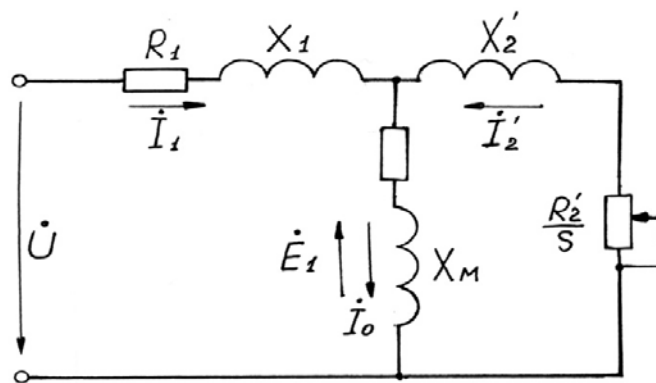


Рис. 2 — Т-образная схема замещения асинхронного двигателя.

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

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

Статорный ток при нагрузке 50%, А

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

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

Ток идеально холостого хода, А

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^*s_n)}I_{1n}\right)^2}{1 - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^*s_n)}I_{1n}\right)^2}} = \sqrt{\frac{58,5^2 - \left(\frac{0,5 \times (1-0,033)}{(1-0,5 \times 0,033)} \times 88,3\right)^2}{1 - \left(\frac{0,5 \times (1-0,033)}{(1-0,5 \times 0,033)}\right)^2}} = 45$$

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:

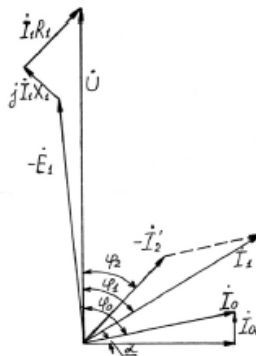
$$\begin{cases} \dot{U} = -\dot{E}_1 + jX_1 \dot{I}_{1н} + R_1 \dot{I}_{1н}; \\ 0 = \dot{E}_1 + jX'_2 \dot{I}_2 + R'_2 \frac{\dot{I}_2}{s_n}; \\ \dot{I}_{1н} = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2); \end{cases}$$


Рис.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^1_2 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

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

Из уравнения критического скольжения

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

Промежуточный коэффициент

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

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

$$L_M = \frac{X_M}{w_0} = \frac{X_M}{2\pi f} = \frac{4,68}{2 \times 3,14 \times 50} = 14,904 \times 10^{-3}$$

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.

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

Результаты расчета параметров Т-образной схемы замещения АД

Таблица №1.2

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 $x_{1\sigma}^*$, о.е.	0,046
Приведенное к статору индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора $x'_{2\sigma}^*$, 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

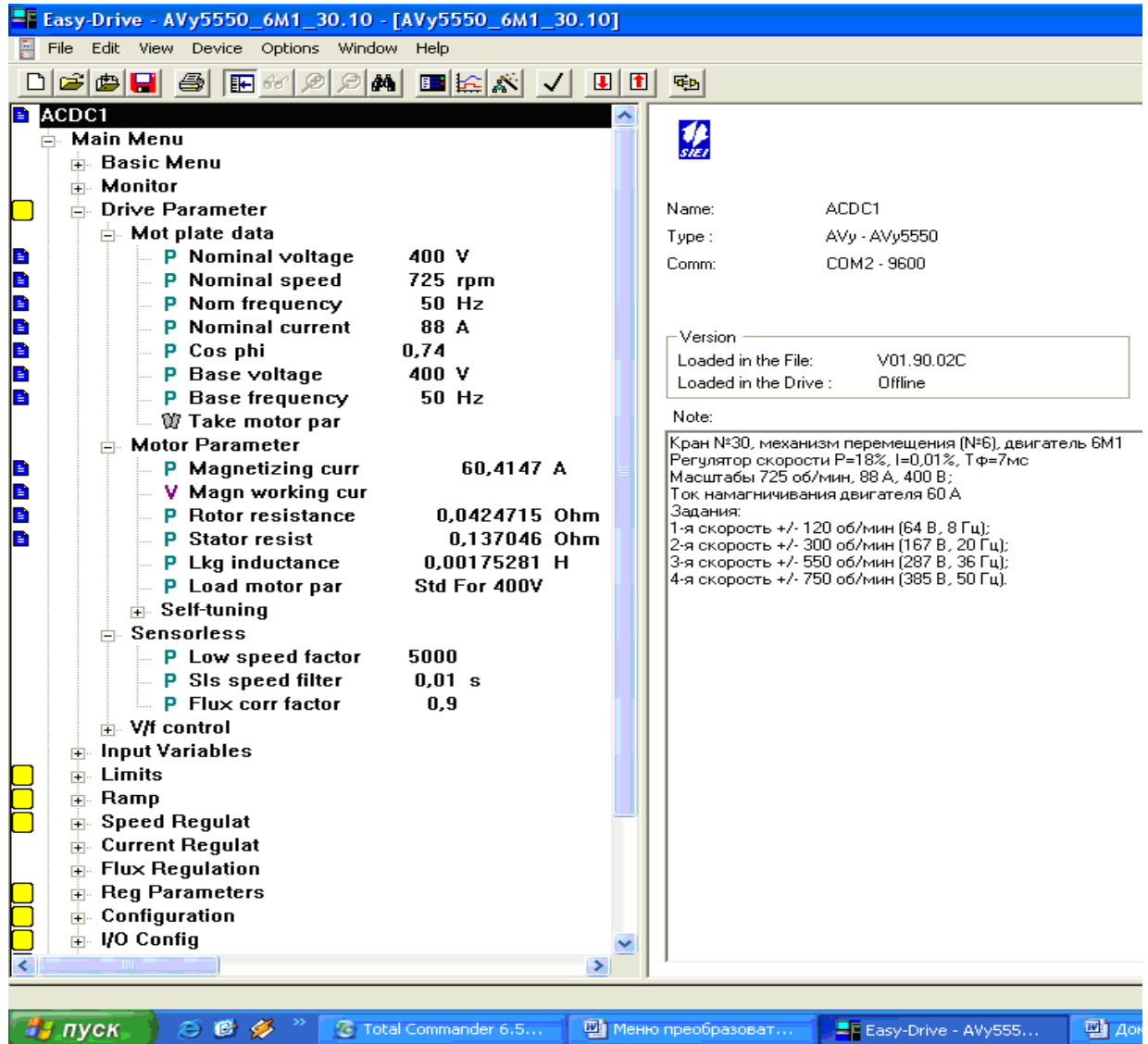


Рис.4 – Меню параметров асинхронной машины в реальных условиях наладки, пакет Easy Drive.

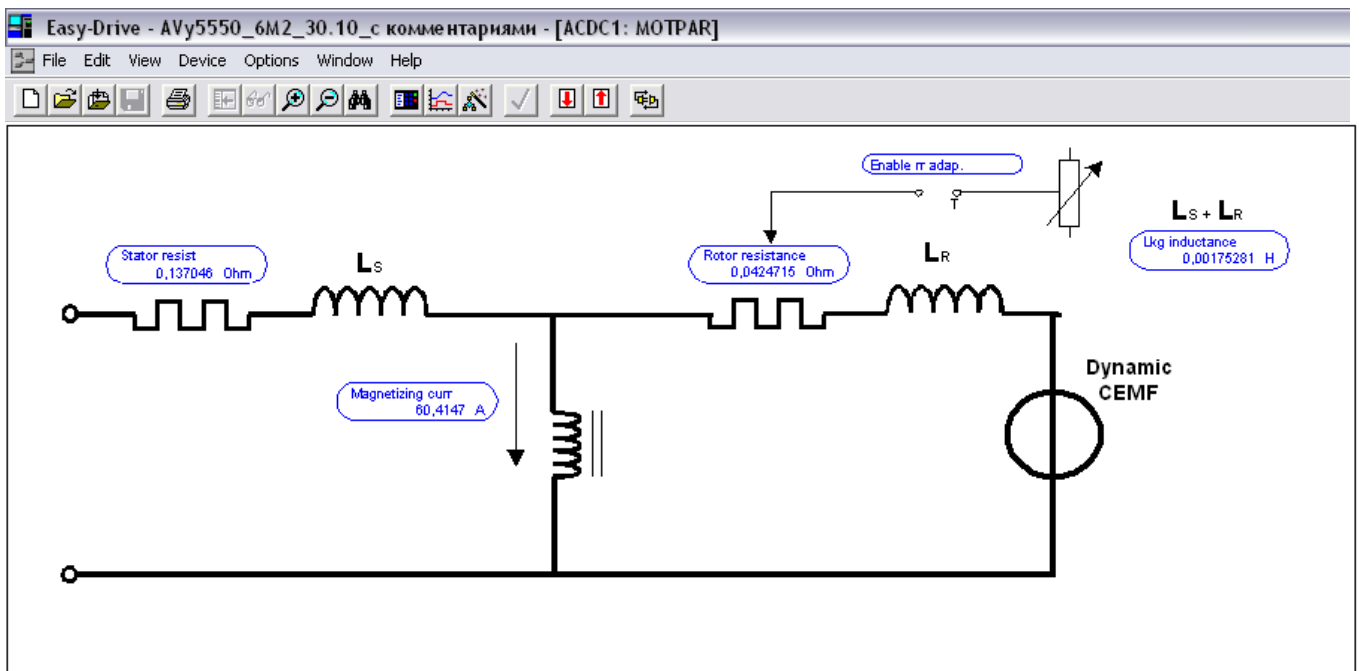


Рис.5 – Меню параметров схемы замещения асинхронной машины в реальных условиях наладки, пакет Easy Drive.

1.1 Анализ полученных результатов

Сравним полученные расчетные данные с экспериментальными данными, полученных в результате пусконаладочных работ, в пакете Easy Drive.

Результаты анализа

Таблица №1.3

Параметр	Обозначение	Данные эксперимента	Данные расчета
Активное сопротивление цепи статора	R_1	0,137 Ом	0,151 Ом
Активное сопротивление цепи ротора приведенная к статору	R_2	0,043 Ом	0,056 Ом
Индуктивность рассеяния асинхронной машины	L_S+L_R	$L_S+L_R = 1,7$ мГн (из меню Easy Drive)	$L_{1\delta}+L_{2\delta} =$ $= 0,365+0,488 =$ $= 0,852$ мГн

Данные анализа свидетельствуют о том, что расчет выполнен корректно, а его средняя погрешность приемлема. Необходимо отметить то, что заметная разница между индуктивностями рассеяния объясняется тем, что двигатель рассчитан по паспортным данным (а он изначально АД с фазным ротором), в процессе модернизации ротор двигателя был замкнут, что вызвало изменение составляющих цепи сопротивления роторной цепи.

Руководствуясь данными расчетами так же можно смоделировать систему векторного и скалярного управления, получив близкие к реальности графики переходных процессов САУ привода.

1.2 Построение графиков переходных процессов и электромеханической характеристики двигателя

На Рис. 6 показана схема, обеспечивающая прямой пуск двигателя и последующее возрастание нагрузки.

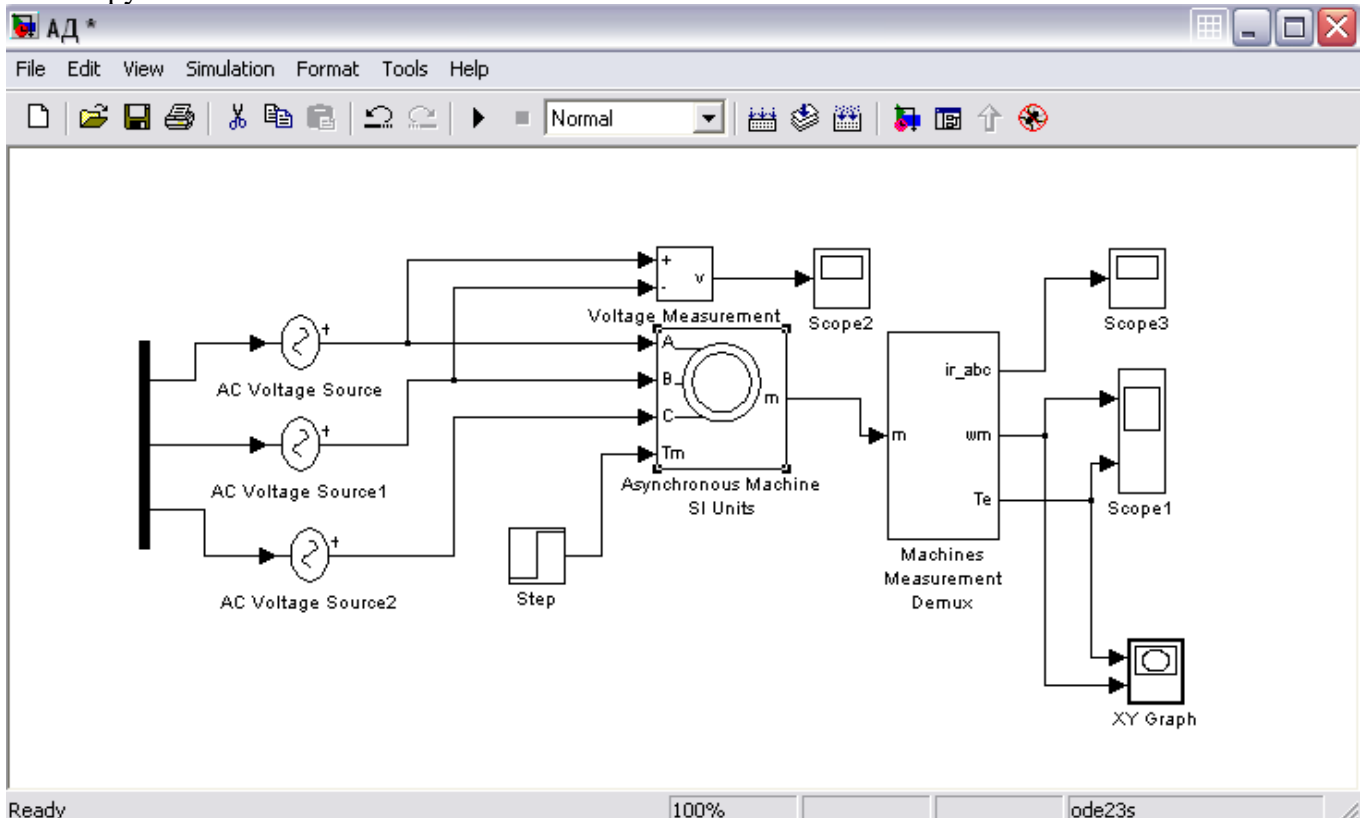


Рис. 6. Схема прямого пуска двигателя

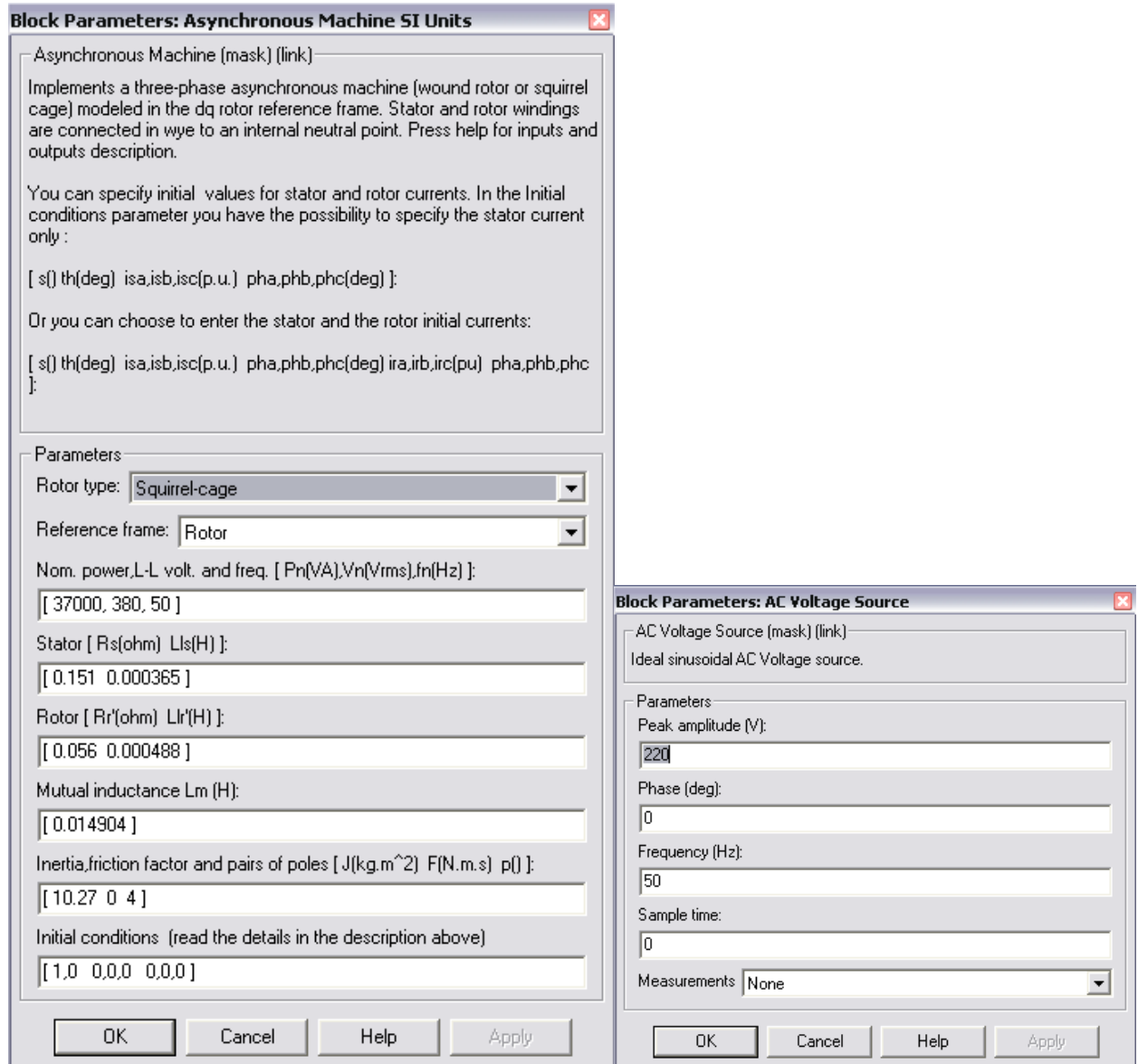


Рис. 7. Расчетные параметры блоков модели асинхронной машины

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

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

На рисунках 8, 9, 10 приведены графики угловой скорости вала и электромагнитного момента, линейного напряжения сети и тока ротора, а также динамическая механическая характеристика двигателя.

Рис. 8. Графики угловой скорости вала и электромагнитного момента.

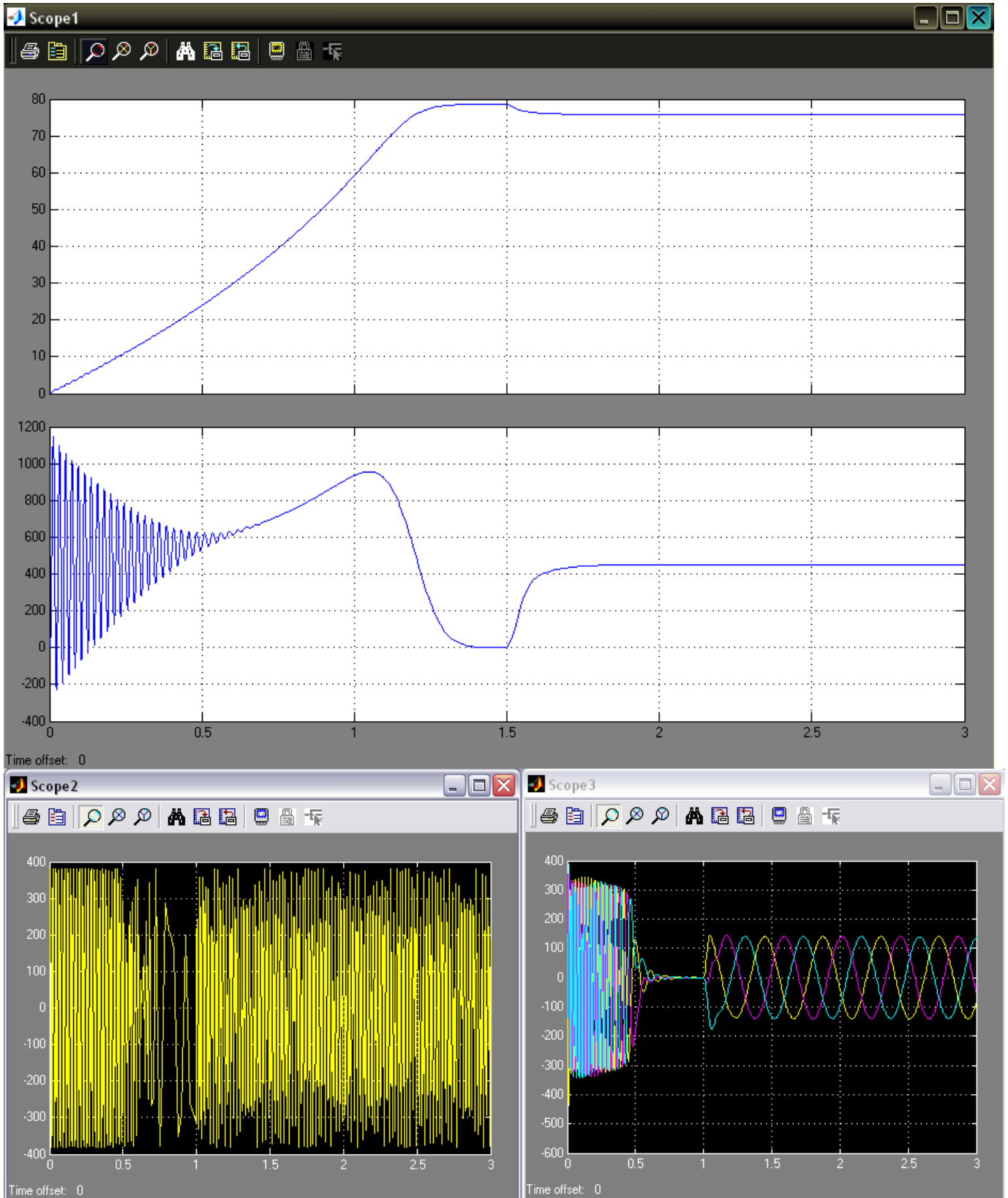


Рис. 9. Графики линейного напряжения сети и тока ротора.

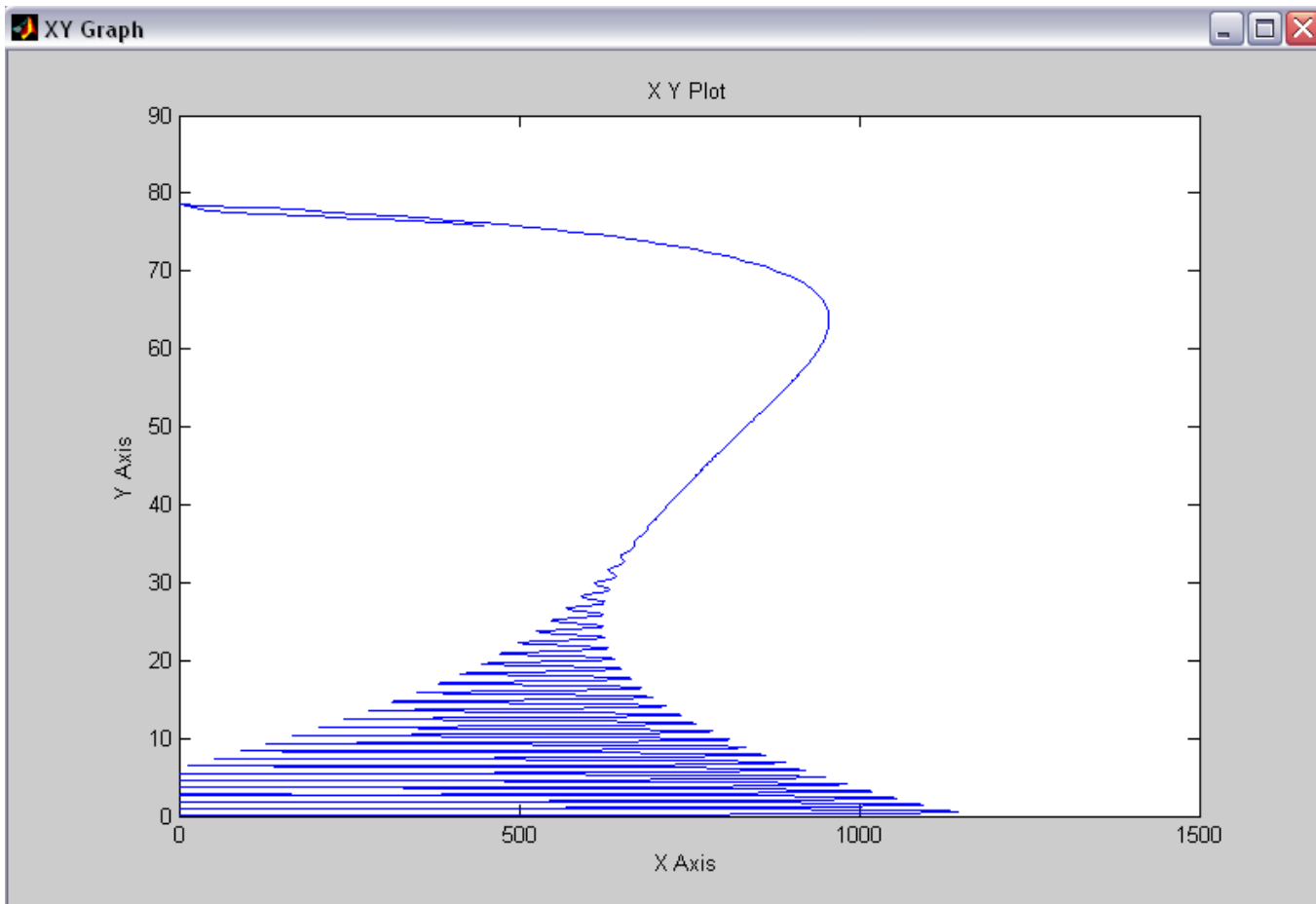


Рис. 10. Электромеханическая характеристика двигателя.

Анализ полученных результатов:

При моделировании асинхронной машины в MetLab 6.5, я отметил то что, данная модель наглядно показывает как ведет себя АД при прямом пуске, полученные графики соответствуют теоретическим выкладкам из литературы, описывающей работу данной системы. Но при моделировании возникли сложности с четким отображением электромагнитного момента на осях координат т.е. при задании расчетных параметров в блок модели, есть существенное отклонение от действительности (номинальный и критический моменты). Последовательность моих действий соответствовала имеющимся руководствам по моделированию данной системы, я предполагаю, что данный «недочет» является следствием, того что модель не учитывает насыщение магнитной системы.

Библиографический список

1. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загривный Э.А. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования. СПб.: СПГГИ, 2006.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: КОРОНА принт, 2001.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001.
4. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005.

СИНТЕЗ ЗАМКНУТОЙ ПО СКОРОСТИ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Структура системы управления

Структура замкнутой по скорости системы скалярного управления асинхронным двигателем изображена на рис. 1. 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.

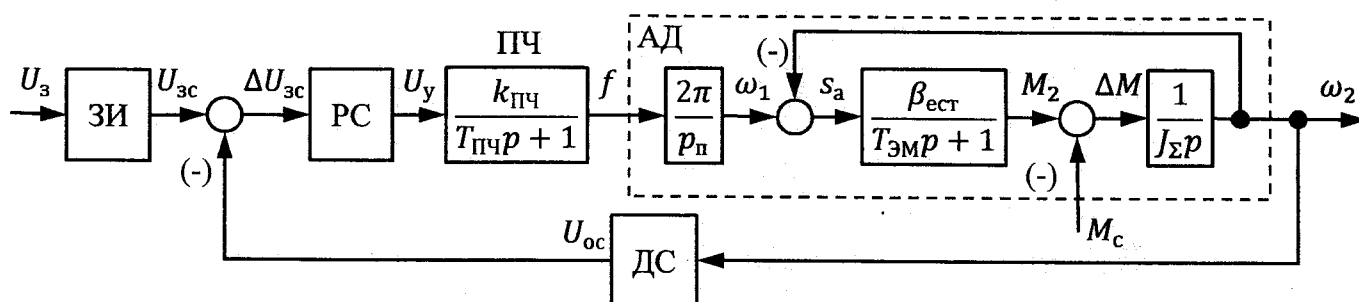


Рис. 1 – Структурная схема замкнутой по скорости системы скалярного управления: ЗИ – задатчик интенсивности; РС – регулятор скорости; ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; ДС – датчик скорости.

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. 1).

Таблица 1 – 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	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
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_n	шт.	
Скорость вращения магнитного поля статора номинальная $\omega_{1н}$	рад/с	
Скорость вращения ротора номинальная $\omega_{2н}$	рад/с	
Момент крутящий номинальный $M_{2н}$	Н·м	
Кратность максимального (критического) момента m_k	о.е.	
Скольжение критическое s_k	о.е.	
Главная индуктивность фазы асинхронной машины L_m	Гн	
Индуктивность рассеяния фазы статора $L_{1\sigma}$	Гн	
Индуктивность рассеяния фазы ротора $L_{2\sigma}$	Гн	
Активное сопротивление фазы статора r_1	Ом	
Активное сопротивление фазы ротора, приведённое к статору r_2'	Ом	
Момент инерции двигателя J_d	кг·м ²	
Момент инерции механизма, приведённый к валу двигателя J_m	кг·м ²	

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:

$$k_{ПЧ} = \frac{\max f}{\max U_y}$$

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:

$$k_c = \frac{2\pi}{p_n}$$

Разницей между угловой скоростью вращения поля статора и ротора является угловая скорость роторной ЭДС или абсолютное значение скольжения. Поэтому $\beta_{ест}$ – 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):

$$\beta_{\text{ест}} = \frac{2M_{\text{к}}}{\omega_{1s_{\text{к}}}} = \frac{2m_{\text{к}}M_{\text{н}}}{\omega_{1s_{\text{к}}}}$$

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:

$$L_{\Sigma} = L_{\Phi} + L_{1\sigma} + L_{2\sigma} + 2L_{\text{м}}$$

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

$$k_2 = \frac{L_{\text{м}}}{L_{2\sigma} + L_{\text{м}}}$$

Тогда суммарное активное сопротивление фазы

$$R_{\Sigma} = r_{\text{т}} + R_{\Phi} + r_1 + k_2^2 r_2'$$

Электромагнитная постоянная времени

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

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

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + J_{\text{м}}$$

При отсутствии данных о механизме допускается принять приведенный к валу двигателя момент инерции механизма равным $1,5J_{\text{д}}$.

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.

$$\begin{aligned} W_{\text{АД}}(p) &= \frac{2\pi}{p_{\text{п}}} \cdot \frac{\beta_{\text{ест}}}{J_{\Sigma} p (T_{\text{ЭМ}} p + 1) \cdot \left(1 + \frac{\beta_{\text{ест}}}{J_{\Sigma} p (T_{\text{ЭМ}} p + 1)}\right)} = \\ &= \frac{2\pi}{p_{\text{п}}} \cdot \frac{\beta_{\text{ест}}}{J_{\Sigma} p (T_{\text{ЭМ}} p + 1) + \beta_{\text{ест}}} = \frac{2\pi}{p_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{T_{\text{м}} p (T_{\text{ЭМ}} p + 1) + 1} \end{aligned}$$

где механическая постоянная времени

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_{\text{ест}}}$$

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

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

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

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

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:

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

Таким образом, получена передаточная функция ПИД-регулятора, где

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{T_m p_n}{2\pi a k_{ПЧ} k_{ДС} T_{ПЧ}}, \\ T_i &= T_m, \\ T_d &= T_{ЭМ}. \end{aligned}$$

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 для вращательного движения:

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

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 датчика интенсивности, то, приняв момент сопротивления со стороны механизма равным номинальному моменту двигателя, можно найти минимально допустимое время пуска привода:

$$t_{\text{п}}^{\text{min}} = \frac{J_\Sigma \omega_{2\text{н}}}{M_{\text{пред}} - M_c} = \frac{J_\Sigma \omega_{2\text{н}}}{m_{\text{к}} M_{2\text{н}} - M_{2\text{н}}} = \frac{J_\Sigma \omega_{2\text{н}}}{(m_{\text{к}} - 1) M_{2\text{н}}}.$$