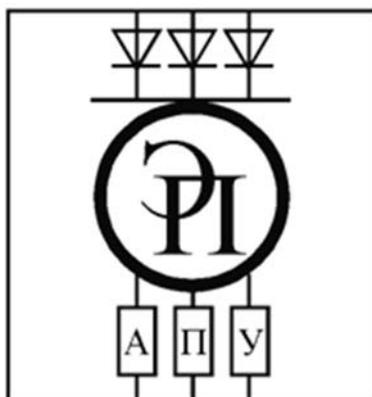


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2023

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Координатные преобразования в системах векторного управления	4
2 Лабораторная работа № 2. Моделирование работы системы вольт-частотного управления	8
3 Лабораторная работа № 3. Моделирование системы векторного управления при постоянном потокосцеплении ротора	13
4 Лабораторная работа № 4. Математические модели асинхронных двигателей для систем векторного управления	18
5 Лабораторная работа № 5. Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами	23
6 Лабораторная работа № 6. Моделирование системы векторного управления АД с к. з. ротором при регулируемом потокосцеплении ротора.....	27
7 Лабораторная работа № 7. Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при регулировании потокосцепления ротора	30
Список литературы	36

1 Лабораторная работа № 1. Координатные преобразования в системах векторного управления

Цель работы: изучить преобразования переменных величин из естественной трехфазной системы координат в двухфазные координатные системы обобщенной машины.

1.1 Общие сведения

При реализации систем векторного управления используются уравнения обобщенной машины в двухфазных системах координат (обобщенная машина Крона). Токи, потоки, напряжения двигателя переменного тока из естественной трёхфазной системы координат могут быть представлены как вектора в этих системах через координатные преобразования к неподвижной системе координат (преобразование Кларка) и затем через координатные преобразования Парка к системе координат, вращающихся с произвольной скоростью.

1 Преобразование из трехфазной естественной системы координат (А, В, С) в двухфазную $\{\alpha, \beta\}$ неподвижную относительно статора (преобразование Кларка).

При описании процессов в электрических машинах комплексная плоскость совпадает и с двухфазной (описание обобщенной машины), и с трёхфазной естественной системами координат. Конечные формулы преобразования из трехфазной естественной системы координат (А, В, С) в двухфазную $\{\alpha, \beta\}$, неподвижную относительно статора, имеют вид

$$U_{\alpha} = k_c \cdot \left(U_a - \frac{1}{2}U_b - \frac{1}{2}U_c \right);$$

$$U_{\beta} = k_c \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_b - \frac{\sqrt{3}}{2}U_c \right).$$

В матричной форме

$$\begin{vmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \end{vmatrix} = k_c \begin{vmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{vmatrix} = k_c \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{vmatrix},$$

где k_c – согласующий коэффициент пропорциональности, $k_c = 2/3$.

По данным формулам схема преобразования представлена на рисунке 1.1.

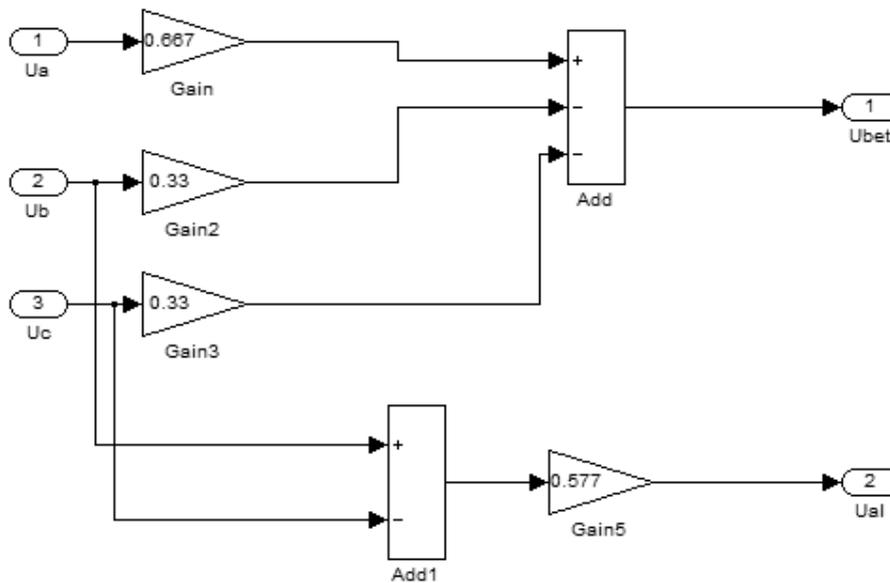


Рисунок 1.1 – Модель преобразование трехфазной системы координат (А, В, С) в двухфазную неподвижную относительно статора $\{\alpha, \beta\}$.

Формулы преобразования для обратного преобразование из двухфазной неподвижной относительно статора системы координат $\{\alpha, \beta\}$ в трехфазную систему координат (А, В, С):

$$U_a = U_\alpha;$$

$$U_b = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta;$$

$$U_c = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta.$$

В матричной форме они имеют вид

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = k_c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = k_c \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}.$$

По данным формулам схема преобразования представлена на рисунке 1.2.

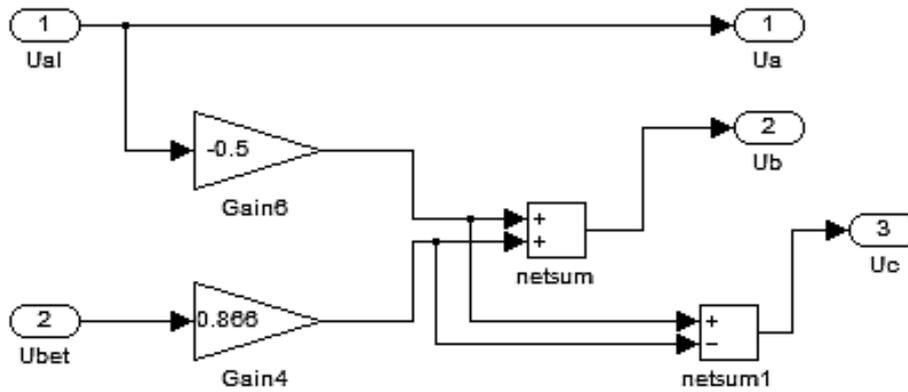


Рисунок 1.2 – Модель преобразование из двухфазной системы координат $\{\alpha, \beta\}$ в трехфазную (A, B, C)

2 Преобразование из двухфазной неподвижной системы координат $\{\alpha, \beta\}$ в систему координат, вращающуюся со скоростью поля в рабочем зазоре $x-y$.
Формулы преобразования:

$$U_x = U_\alpha \cos \varphi + U_\beta \sin \varphi;$$

$$U_y = -U_\alpha \sin \varphi + U_\beta \cos \varphi.$$

В матричной форме они имеют вид

$$\begin{vmatrix} U_x \\ U_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & +\sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{vmatrix}.$$

По данным формулам схема преобразования представлена на рисунке 1.3.

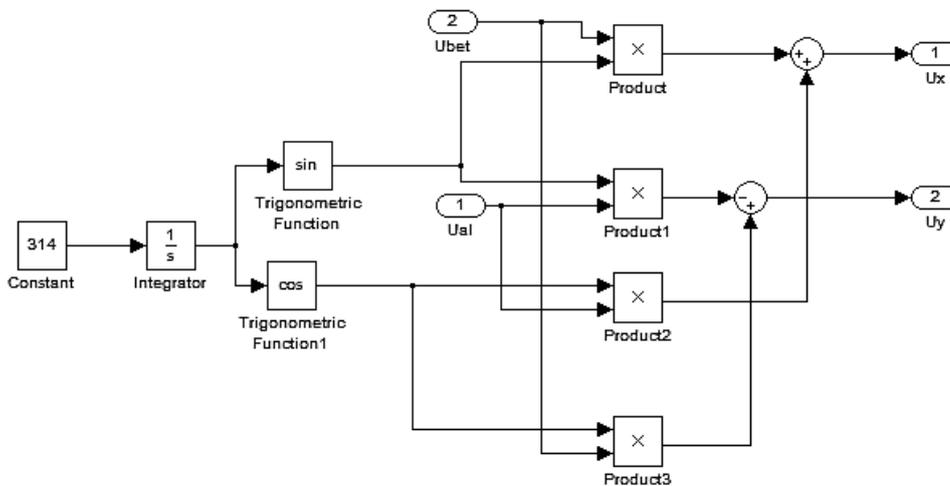


Рисунок 1.3 – Модель преобразование двухфазной системы координат $\{\alpha, \beta\}$ в систему координат $x-y$

Обратное преобразование из системы координат $y-x$ в неподвижную $\{\alpha, \beta\}$.
 Формулы преобразования:

$$U_{\alpha} = U_x \cos \varphi - U_y \sin \varphi;$$

$$U_{\beta} = U_x \sin \varphi + U_y \cos \varphi.$$

В матричной форме они имеют вид

$$\begin{vmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_x \\ U_y \end{vmatrix}.$$

1.2 Программа выполнения работы

1 В среде МАТЛАБ смоделировать прямые и обратные преобразования Кларка и Парка для трехфазных напряжений и проанализировать соответствующие графики.

2 Смоделировать прямой пуск асинхронного двигателя (параметры двигателя в соответствии с вариантом задаются преподавателем) в программе Matlab. Вариант схемы прямого пуска АД представлен на рисунке 1.4.

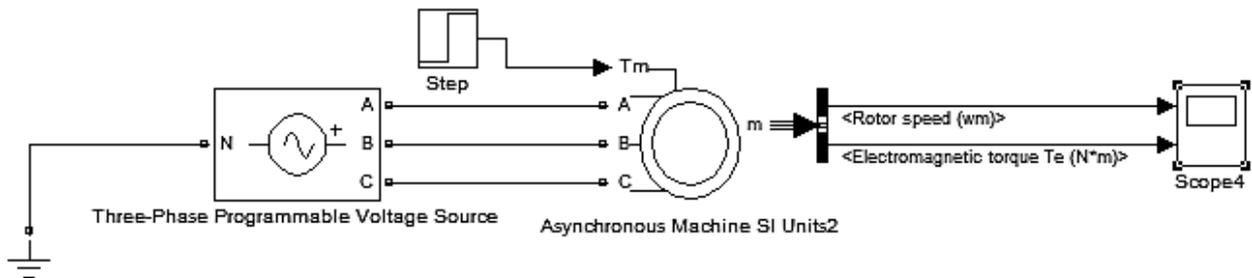


Рисунок 1.4 – Модель прямого пуска асинхронного двигателя

3 Смоделировать прямой пуск двигателя, используя прямое и обратное координатные преобразования Кларка и Парка для формирования трехфазной системы напряжений на двигателе. Сравнить с результатом, полученным в п. 2.

Схема пуска АД для этого случая, представлена на рисунке 1.5.

Контрольные вопросы

- 1 Запишите преобразование Кларка прямое и обратное.
- 2 Запишите преобразование Парка прямое и обратное.
- 3 Понятие обобщенной машины.
- 4 Назовите основные системы координат, используемые в системах векторного управления. Дайте им характеристику.

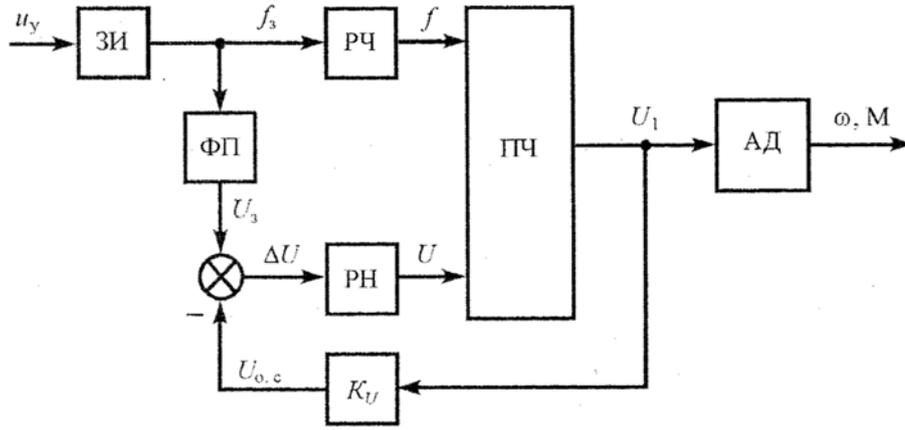


Рисунок 2.1 – Блок-схема привода

1 Модель АД с к. з. ротором в синхронно вращающихся осях $y-x$ при ориентации оси x по вектору потокосцепления ротора.

Модель АД с к. з. ротором может быть реализована разными способами. Например, она может быть реализована в виде модели обобщенной машины в осях $y-x$, вращающихся с синхронной скоростью.

Уравнения двигателя в этом случае следующие:

$$u_{1x} = i_{1x}R_1 + L_1 \frac{di_{1x}}{dt} + L_{12} \frac{di'_{2x}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1y} + L_2 i'_{2y});$$

$$u_{1y} = i_{1y}R_1 + L_1 \frac{di_{1y}}{dt} + L_{12} \frac{di'_{2y}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1x} + L_2 i'_{2x});$$

$$0 = i'_{2x}R'_2 + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - \Delta\omega_{эл} \psi_{2y}; \quad 0 = i'_{2y}R'_2 + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + \Delta\omega_{эл} \psi_{2x};$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_{12} (i_{1y} i'_{2x} - i_{1x} i'_{2y});$$

$$\psi_{2x} = L_2 i'_{2x} + L_{12} i_{1x}; \quad \psi_{2y} = L_2 i'_{2y} + L_{12} i_{1y};$$

$$\Delta\omega_{эл} = \omega_1 - \omega_{эл},$$

где L_{12} – значение взаимной индуктивности АД;

R_1, R'_2 – активные сопротивления фаз обмотки статора и ротора;

u_{1x}, u_{1y} – напряжения статора АД по осям $x-y$;

i_{1x}, i_{1y} – токи статора АД по осям $x-y$;

ψ_{1x}, ψ_{1y} – потокосцепления статора АД по осям $x-y$;

ψ_{2x}, ψ_{2y} – потокосцепления ротора по осям $x-y$;

i'_{2x}, i'_{2y} – приведенные токи ротора АД по осям $x-y$;

$\omega_{\text{эл}}$ – электрическая угловая скорость ротора, $\omega_{\text{эл}} = p_n \cdot \omega$;

ω – механическая угловая скорость ротора;

ω_1 – угловая частота, $\omega_1 = 2\pi f_1$.

При ориентации оси x по вектору потокосцепления ротора модель асинхронного двигателя в системе Simulink показана на рисунке 2.2.

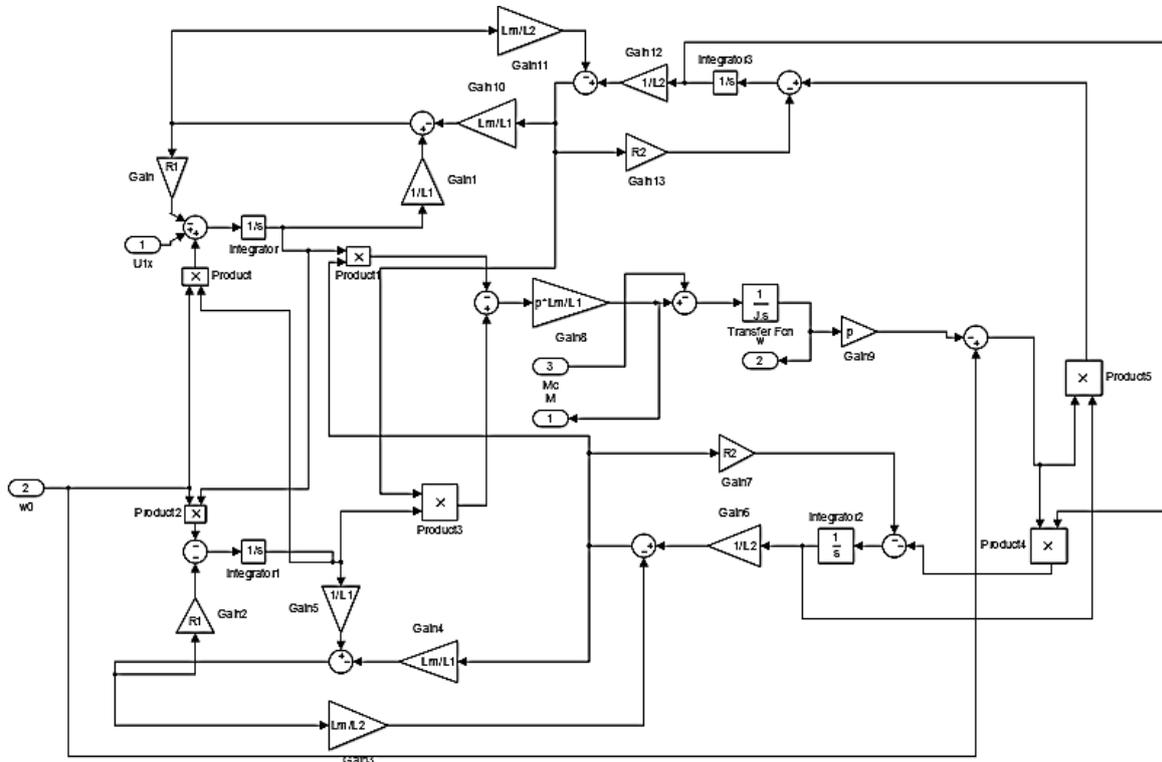


Рисунок 2.2 – Схема модели АД с к. з. ротором в осях x - y в системе Simulink

Схема модели АД с к. з. ротором представлена в виде блока (рисунок 2.3).

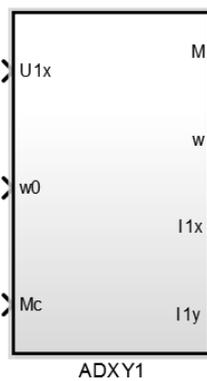


Рисунок 2.3 – Блок АД с к. з. ротором

2 Схема модели скалярного привода ПЧ-АД для двигателя (таблица 2.1, рисунок 2.2), разработанная в системе MATLAB/Simulink, представлена на рисунке 2.4.

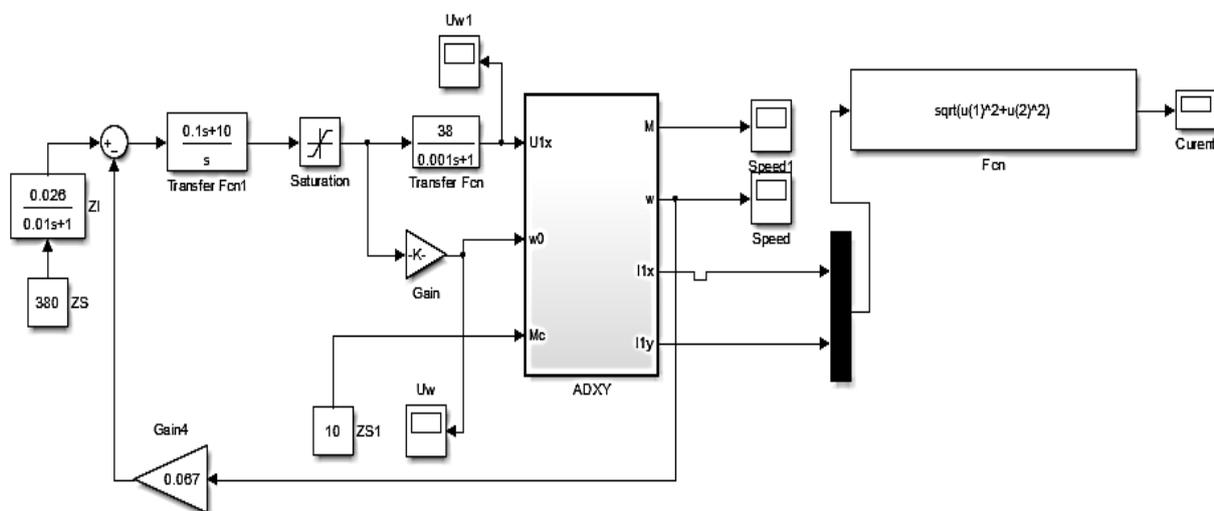


Рисунок 2.4 – Схема модели ПЧ-АД в системе Simulink

Таблица 2.1 – Характеристики АД

Характеристика	Значение
Тип двигателя	4А112М4
Мощность P , Вт	5500
Частота f , Гц	50
Сопротивление статора $R1$, Ом	1,32
Индуктивность статора $L1$, Гн	0,169
Сопротивление ротора $R2$, Ом	0,922
Индуктивность ротора $L2$, Гн	0,1715
Момент инерции J , кг·м ²	0,0206

Преобразователь частоты имеет два канала управления:

– по напряжению, который описывается аperiодическим звеном первого порядка;

– по частоте, описываемый безынерционным звеном с коэффициентом передачи K .

Регулятор скорости в общем случае может быть представлен ПИ-регулятором (рисунок 2.5).

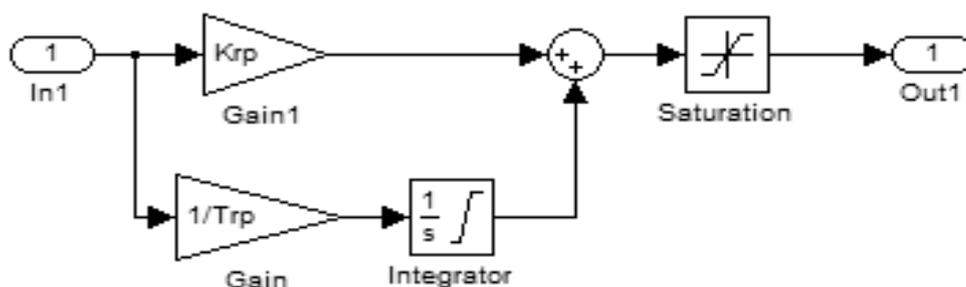


Рисунок 2.5 – Схема ПИ-регулятора

2.2 Ход работы

1 Рассчитать параметры ПИ-регулятора для привода (см. рисунок 2.4) в соответствии с рекомендациями [3] и по данным двигателя, используемого для моделирования (выдается преподавателем в соответствии с вариантом).

2 Смоделировать модель асинхронного двигателя (см. рисунок 2.2).

3 Смоделировать электропривод (см. рисунок 2.4) для разных нагрузок и скоростей вращения (задается преподавателем).

4 Дополнить модель электропривода блоками преобразования переменных двигателя из осей $y-x$ в неподвижную $\{\alpha, \beta\}$ и затем в трехфазную естественную систему координат и выполнить моделирование для этого случая. Схема преобразования, например, переменных из системы координат $\alpha-\beta$ в естественную трехфазную систему координат А, В, С представлена на рисунке 2.6.

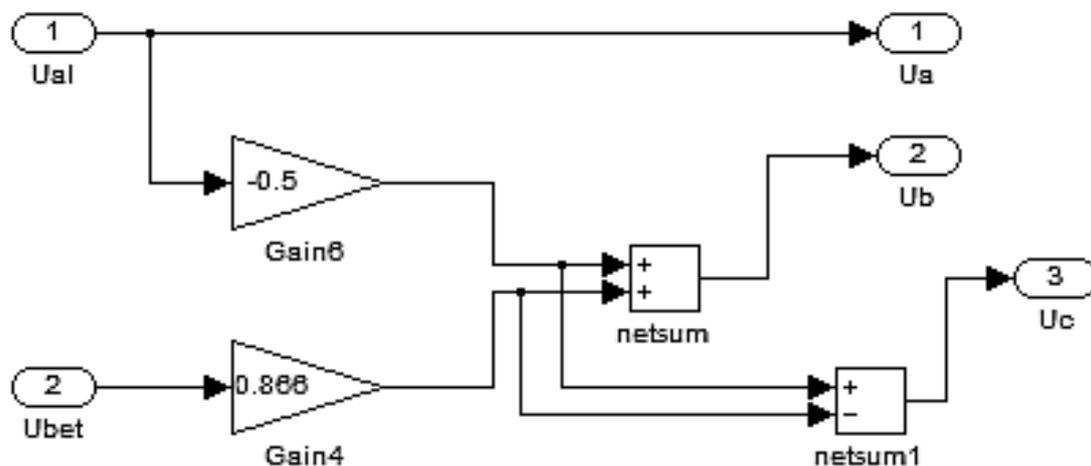


Рисунок 2.6 – Схема преобразования переменных из системы координат $\alpha-\beta$ в естественную трехфазную систему координат А, В, С

Контрольные вопросы

- 1 Как понимаете скалярное частотное управление.
- 2 Уравнения асинхронного двигателя в осях $y-x$.
- 3 Понятие обобщенной машины.
- 4 Назовите основные системы координат, используемые в системах векторного управления. Дайте им характеристику.
- 5 Что значит ориентация оси x по вектору потокосцепления ротора?

3 Лабораторная работа № 3. Моделирование системы векторного управления при постоянном потокосцеплении ротора

Цель работы: изучение функциональной схемы системы векторного управления АД с к. з. ротором и с опорным вектором по потокосцеплению ротора; практическая реализация модели системы векторного управления в среде МАТЛАБ; получение практических навыков коррекции параметров векторной системы и проведения экспериментов с компьютерной моделью ЭП.

3.1 Общие сведения

3.1.1 Векторное управление. Это частотное управление, где в качестве управляющих воздействий используются пространственные векторы электромагнитных величин. При векторном управлении возможно независимое управление магнитным потоком и электромагнитным моментом двигателя с помощью составляющих (проекций в соответствующих системах координат) вектора тока статора, подобно независимому регулированию момента и магнитного потока в двигателе постоянного тока независимого возбуждения.

При реализации систем векторного управления используются уравнения обобщенной машины в двухфазных системах координат (обобщенная машина Крона). Токи, потоки, напряжения двигателя переменного тока могут быть представлены как вектора в этих системах через координатные преобразования из трехфазной естественной системы координат к неподвижной системе координат (преобразование Кларка) и через координатные преобразования Парка к системе координат, вращающихся с произвольной скоростью. Частные случаи – это система координат неподвижная относительно статора; система координат, вращающаяся со скоростью ротора $d-q$; система координат, вращающаяся со скоростью поля в рабочем зазоре машины $y-x$.

По способу вычисления угла между неподвижной системой координат и системой вращающихся координат в преобразовании Парка все системы векторного управления делятся на две группы с дальнейшей классификацией по ряду других признаков: системы прямого векторного управления и системы косвенного векторного управления. Например, по наличию соответствующих датчиков потокосцепления или их отсутствию системы прямого векторного управления делятся на системы датчикового и бездатчикового прямого векторного управления.

Упрощенная функциональная блок-схема системы прямого бездатчикового векторного управления представлена на рисунке 3.1.

На рисунке РС, РП, РТ – регулятор скорости, регулятор потока, регулятор тока соответственно; ПК1, ПК2 – преобразователи координат; ПС – вектор переменных состояния.

Вычислитель по уравнениям, например, статора асинхронного двигателя в неподвижной системе координат $\{\alpha, \beta\}$, позволяет определить угол сдвига между системами координат и выполнить преобразование вектора переменных

статора, определяющей поток двигателя;

2) скоростью вращения ротора, выполненного в виде двухконтурной системы починенного регулирования с внутренним контуром регулирования скоростной составляющей тока статора.

На рисунке 3.3 представлена Simulink-модель этого электропривода и введены следующие переменные, описывающие параметры рассматриваемой системы:

U_{zs} – напряжение задания скорости ЭП;

U_{zp} – напряжение задания потокосцепления;

R_{e1} – эквивалентное активное сопротивление статора первого токового контура;

L_1 – индуктивность цепи статора;

L_2 – индуктивность приведенной цепи ротора;

L_m – взаимная индуктивность магнитной цепи;

p_n – число пар полюсов АД;

J_{np} – момент инерции ЭП, приведенный к валу АД;

K_{ds} – коэффициент передачи датчика скорости;

K_{dt1} – коэффициент передачи обратной связи по i_{1a} ;

K_{dt2} – коэффициент передачи обратной связи по i_{1b} ;

k_2 – коэффициент электромагнитной связи ротора;

T_1 – электрическая постоянная времени обмотки статора;

T_2 – электрическая постоянная времени обмотки ротора;

K_p – коэффициент передачи ПЧ;

T_m – постоянная времени ПЧ;

K_{dp} – коэффициент передачи ДП;

K_{pn} – коэффициент передачи регулятора потокосцепления;

T_{pn} – постоянная времени интегрирования РП;

K_{rt1} – коэффициент передачи регулятора РТ1;

K_{rt2} – коэффициент передачи регулятора РТ2;

T_{rt1} – постоянная времени интегрирования РТ1;

T_{rt2} – постоянная времени интегрирования РТ2;

K_{rs} – коэффициент передачи регулятора скорости;

T_{rs} – постоянная времени интегрирования РС;

T_{zs} – постоянная времени задатчика интенсивности.

В электроприводе в качестве регуляторов используются ПИ-регуляторы (рисунок 3.4).

3.1.2 Расчет параметров математической модели.

1 Вычисление параметров асинхронного двигателя.

1.1 Номинальная синхронная частота вращения при $f_{nom} = 50$ Гц и числе пар полюсов p вычисляется по формуле

$$n_{0nom} = \frac{60 \cdot f_{1nom}}{p}.$$

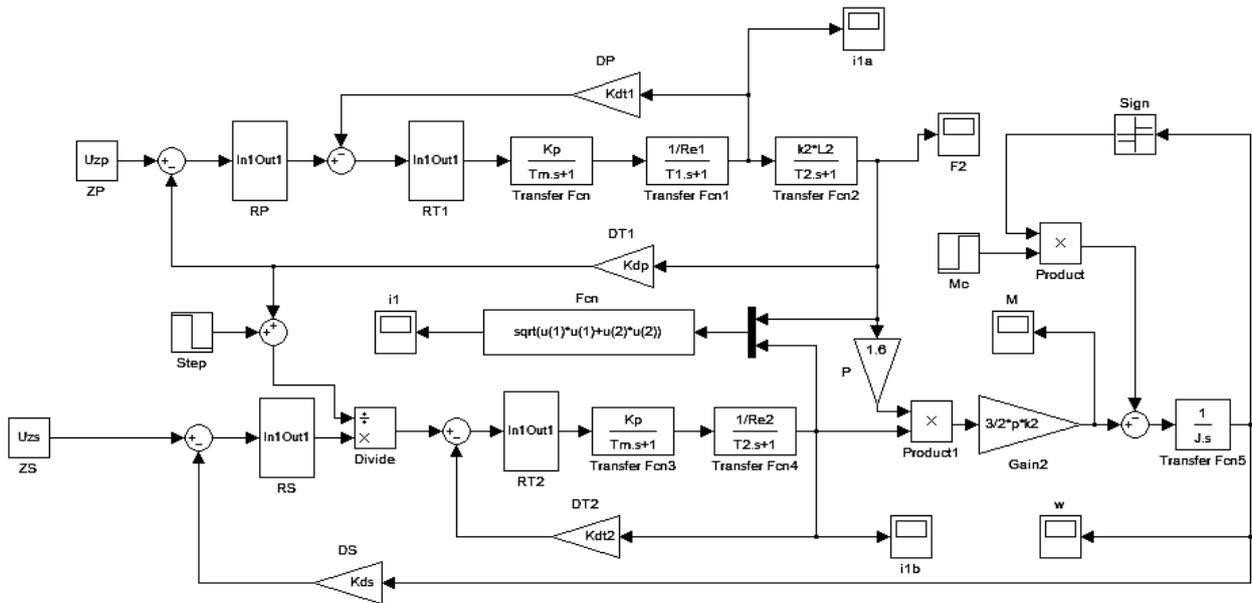


Рисунок 3.3 – Simulink-модель электропривода с прямым векторным бездатчиковым управлением

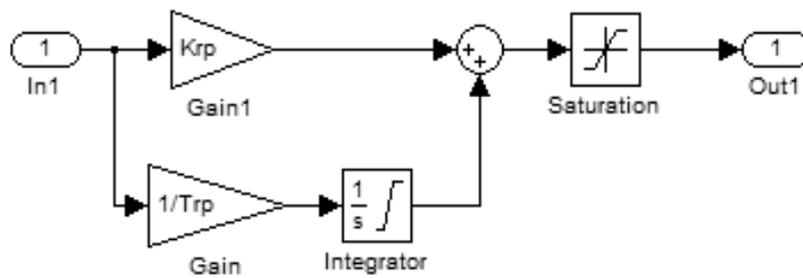


Рисунок 3.4 – Модель ПИ-регулятора

1.2 Электрическая постоянная времени обмотки ротора АД

$$T_2 = \frac{L_2}{R_{e2}}.$$

2 Вычисление параметров датчиков обратных связей.

2.1 Максимальные значения напряжения и потокосцепления принимаем равными

$$U_{\max} = 10, \quad \psi = 1.$$

2.2 Максимальное значение скорости

$$\omega_{\max} = \omega_{\text{ном}}.$$

2.3 Коэффициент передачи датчика потокосцепления

$$K_{dp} = \frac{U_{\max}}{\Psi}.$$

2.4 Коэффициент передачи датчика скорости

$$K_{ds} = \frac{U_{\max}}{\omega_{\max}}.$$

3 Определение параметров регуляторов.

3.1 Коэффициент передачи РТ1 определяется по формуле

$$K_{rt1} = \frac{R_{e1} \cdot T_1}{2 \cdot T_m \cdot K_p \cdot K_{dt1}}.$$

3.2 Постоянная времени интегрирования РТ1 вычисляется по формуле

$$T_{rt1} = \frac{2 \cdot T_m \cdot K_p \cdot K_{dt1}}{R_{e1}}.$$

3.3 Коэффициент передачи РТ2

$$K_{rt2} = \frac{R_{e2} \cdot T_2}{2 \cdot T_m \cdot K_p \cdot K_{dt2}}.$$

3.4 Постоянная времени интегрирования РТ2

$$T_{rt2} = \frac{2 \cdot T_m \cdot K_p \cdot K_{dt2}}{R_{e2}}.$$

3.5 Коэффициент

$$k_3 = \frac{T_1 + T_m}{T_1 + 2 \cdot T_m}.$$

3.6 Коэффициент передачи РС

$$K_{rs} = \frac{J \cdot K_{dt2}}{16 \cdot T_m \cdot p \cdot K_{ds} \cdot k_3 \cdot k_2}.$$

3.7 Постоянная времени РС

$$T_{rs} = \frac{16 \cdot T_m}{K_{rs}}.$$

3.2 Программа выполнения работы

1 В соответствии с вариантом (выдается преподавателем) рассчитать параметры ПИ-регуляторов для электропривода (рисунок 3.2).

2 Набрать в среде МАТЛАБ модель электропривода (см. рисунок 3.2).

3 Смоделировать работу электропривода при различных моментах нагрузки и для разных задаваемых значений скорости в соответствии с вариантом выполнения и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Приведите классификацию систем векторного управления.

2 Назначение и работа блоков в схеме электропривода по рисунку 3.1.

3 Назовите основные системы координат, используемые при реализации систем векторного управления.

4 Работа электропривода в соответствии с моделью на рисунке 3.3.

4 Лабораторная работа № 4. Математические модели асинхронных двигателей для систем векторного управления

Цель работы: изучение и построение моделей асинхронного двигателя с к. з. ротором в системе синхронно вращающихся координатных осей x – y при различной ориентации координатной оси x .

4.1 Общие сведения

Модель АД с к. з. ротором для целей векторного управления может быть реализована разными способами и в разных системах координат. Например, она может быть реализована в виде модели двухфазной машины в осях y – x , вращающихся с синхронной скоростью. Эта реализация наиболее употребительна в системах векторного управления. Уравнения двигателя в этом случае следующие:

$$u_{1x} = i_{1x}R_1 + L_1 \frac{di_{1x}}{dt} + L_{12} \frac{di'_{2x}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1y} + L_2 i'_{2y});$$

$$u_{1y} = i_{1y}R_1 + L_1 \frac{di_{1y}}{dt} + L_{12} \frac{di'_{2y}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1x} + L_{12} i'_{2x});$$

$$0 = i'_{2x} R'_2 + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - \Delta\omega_{эл} \psi_{2y}; \quad 0 = i'_{2y} R'_2 + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + \Delta\omega_{эл} \psi_{2x};$$

$$\psi_{2x} = L_2 i'_{2x} + L_{12} i_{1x}; \quad \psi_{2y} = L_2 i'_{2y} + L_{12} i_{1y};$$

$$\Delta\omega_{эл} = \omega_1 - \omega_{эл}; \quad M = \frac{3}{2} p_n L_{12} (i_{1y} i'_{2x} - i_{1x} i'_{2y}),$$

где L_{12} – значение взаимной индуктивности АД;

R_1, R'_2 – активные сопротивления фаз обмотки статора и ротора;

u_{1x}, u_{1y} – напряжения статора АД по осям x – y ;

i_{1x}, i_{1y} – токи статора АД по осям x – y ;

ψ_{1x}, ψ_{1y} – потокосцепления статора АД по осям x – y ;

ψ_{2x}, ψ_{2y} – потокосцепления ротора по осям x – y ;

i'_{2x}, i'_{2y} – приведенные токи ротора АД по осям x – y ;

$\omega_{эл}$ – электрическая угловая скорость ротора, $\omega_{эл} = p_n \cdot \omega$;

ω – механическая угловая скорость ротора;

ω_1 – угловая частота, $\omega_1 = 2\pi f_1$.

Для реализации цели векторного управления ось x системы координат x – y может быть ориентирована вдоль векторов потокосцепления ротора, взаимоиндукции, статора (рисунок 4.1).

Соответственно, могут быть получены различные системы векторного управления на основе структурных схем соответствующих математических моделей асинхронных двигателей.

4.1.1 Ориентация оси x вдоль вектора потокосцепления ротора ψ_2 .

Для этого случая уравнения двухфазного асинхронного двигателя в осях x – y могут быть преобразованы к следующему виду:

$$u_{1x}^* = u_{1x} + u_{kx} = R_1 \left(i_{1x} + T_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} \right);$$

$$u_{1y}^* = u_{1y} + u_{ky} = R_1 \left(i_{1y} + T_{1y} \frac{di_{1y}}{dt} \right),$$

где

$$T_{1x} = \frac{L_{1\sigma}}{R_1}; \quad T_{1y} = \frac{\sigma L_1}{R_1};$$

$$u_{kx} = -\omega_1 \sigma L_1 i_{1y}; \quad u_{ky} = \omega_1 (L_{1\sigma} i_{1x} + \psi_{2x}).$$

Этим уравнениям соответствует структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя (рисунок 4.2).

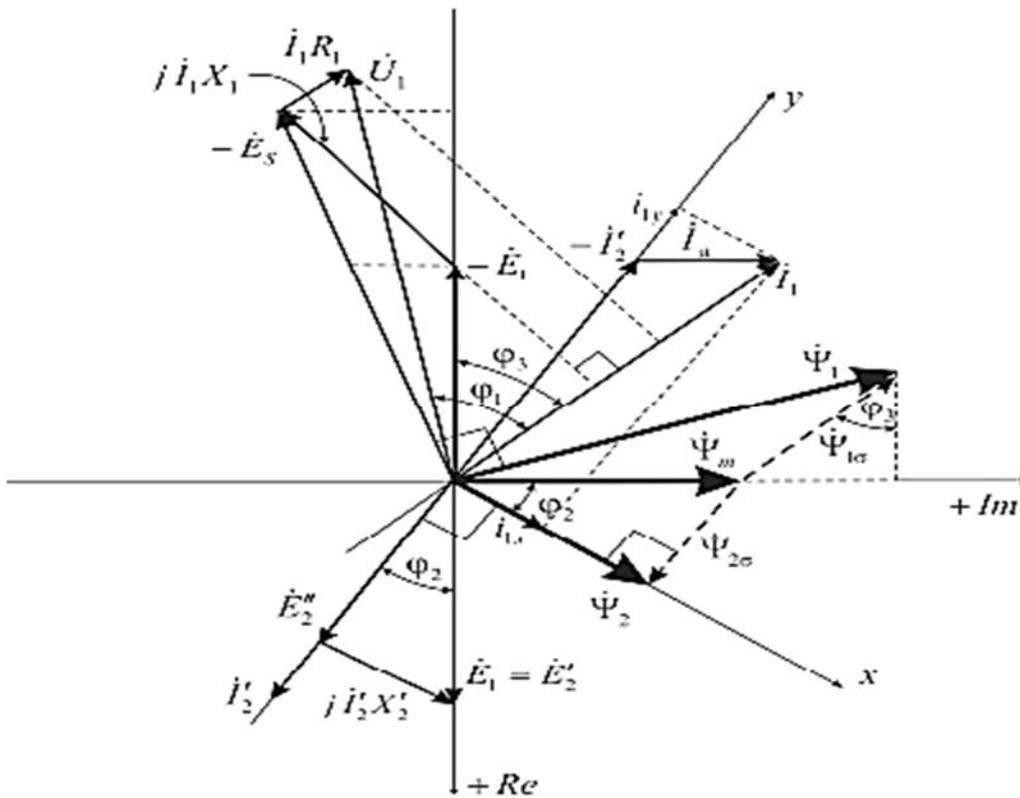


Рисунок 4.1 – Векторная диаграмма АД в комплексной плоскости

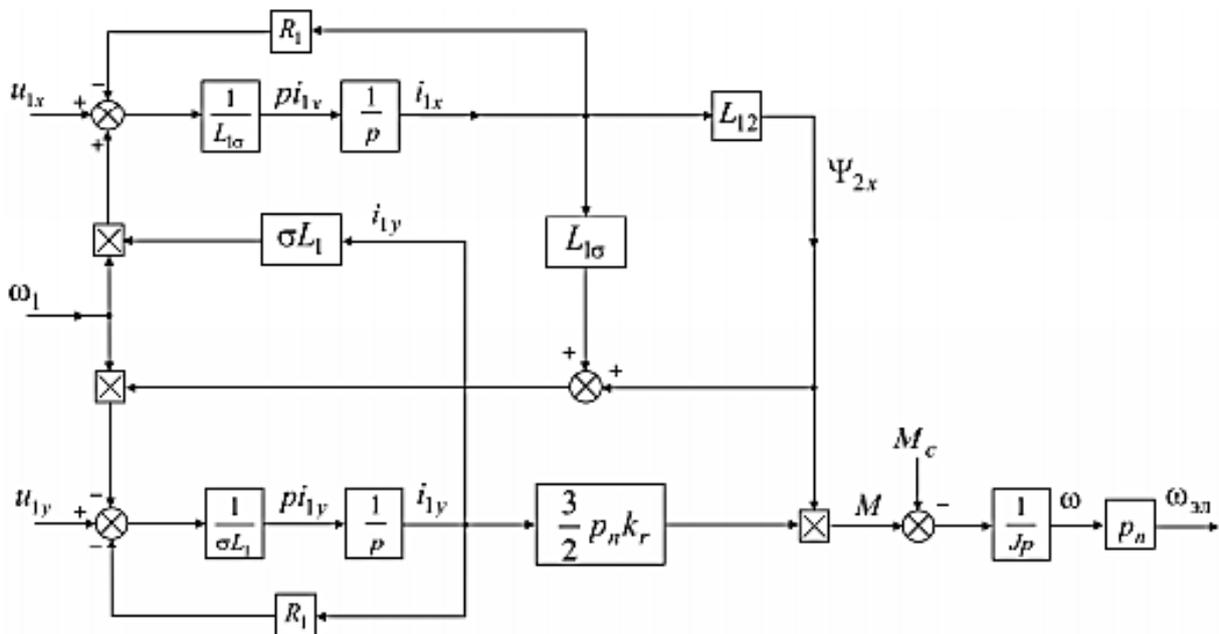


Рисунок 4.2 – Структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя при ориентации оси x вдоль вектора потокосцепления ротора Ψ_2

4.1.2 Ориентация оси x вдоль вектора потокосцепления взаимоиндукции Ψ_m .

Для этого случая уравнения двухфазного асинхронного двигателя в осях x - y могут быть преобразованы к следующему виду:

$$u_{1x}^* = u_{1x} + u_{kx} = R_{\text{эл}} \left(i_{1x} + T_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} \right);$$

$$u_{1y}^* = u_{1y} + u_{ky} = R_{\text{эл}} \left(i_{1y} + T_{1x} \frac{di_{1y}}{dt} \right);$$

$$i'_{2x} + T_{2\sigma} \frac{di_{2x}}{dt} = -\Delta\omega_{\text{эл}} T_{2\sigma} i_{1y};$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \Psi_{mx} i_{1y}; \quad \Psi_{mx} = L_{12} (i_{1x} + i'_{2x});$$

$$u_{kx} = \omega_1 L_{1\sigma} i_{1y}; \quad u_{ky} = -\omega_1 L_{1\sigma} i_{1x} - \omega_{\text{эл}} \Psi_{mx};$$

$$T_{1x} = \frac{L_{1\sigma}}{R_{\text{эл}}}; \quad T_{2\sigma} = \frac{L_{2\sigma}}{R'_2}; \quad R_{1\sigma} = R_1 + k_r R'_2;$$

$$\Delta\omega_{\text{эл}} = \omega_1 - \omega_{\text{эл}}; \quad \omega_{\text{эл}} = p_n \omega.$$

Этим уравнениям соответствует структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя (рисунок 4.3).

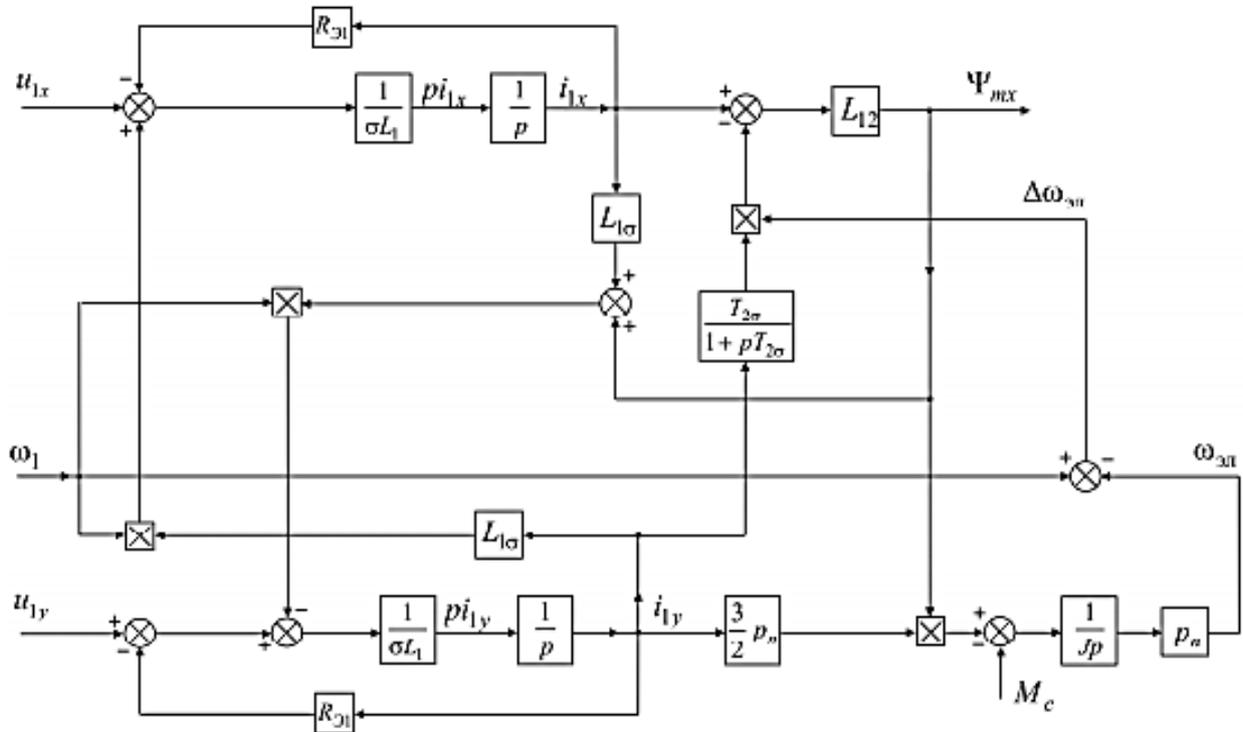


Рисунок 4.3 – Структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя при ориентации оси x вдоль вектора взаимоиנדукции Ψ_m

4.1.3 Ориентация оси x вдоль вектора потокосцепления статора Ψ_1 .

Для этого случая уравнения двухфазного асинхронного двигателя в осях x – y могут быть преобразованы к следующему виду:

$$u_{1x} = R_{\sigma 2} \left(i_{1x} + T_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} \right) - \Delta\omega_{\text{эл}} L_1 i_{1y} \sigma - \frac{1}{T_2} \Psi_{1x};$$

$$u_{1y} = R_{\sigma 2} \left(i_{1y} + T_{1x} \frac{di_{1y}}{dt} \right) + \omega_{\text{эл}} \Psi_{1x} + \Delta\omega_{\text{эл}} L_1 i_{1x} \sigma;$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \Psi_{1x} i_{1y}; \quad T_{1x} = \frac{L_{1\sigma}}{R_{\sigma 2}}; \quad T_{\sigma} = \frac{L_{1\sigma}}{R_{\sigma 2}}; \quad R_{2\sigma} = R_1 + \frac{L_1}{L_2} R_2';$$

$$\Delta\omega_{\text{эл}} = \omega_1 - \omega_{\text{эл}}; \quad \omega_{\text{эл}} = p_n \omega;$$

$$L_{2\sigma} = L_2 \left(a + \frac{L_1}{L_2} \right); \quad T_2 = L_2 / R_2'; \quad a = R_1 / R_2';$$

$$\Psi_{1x} = L_{2\sigma} \left(i_{1x} + T_{\sigma} \frac{di_{1x}}{dt} \right).$$

Этим уравнениям соответствует структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя (рисунок 4.4).

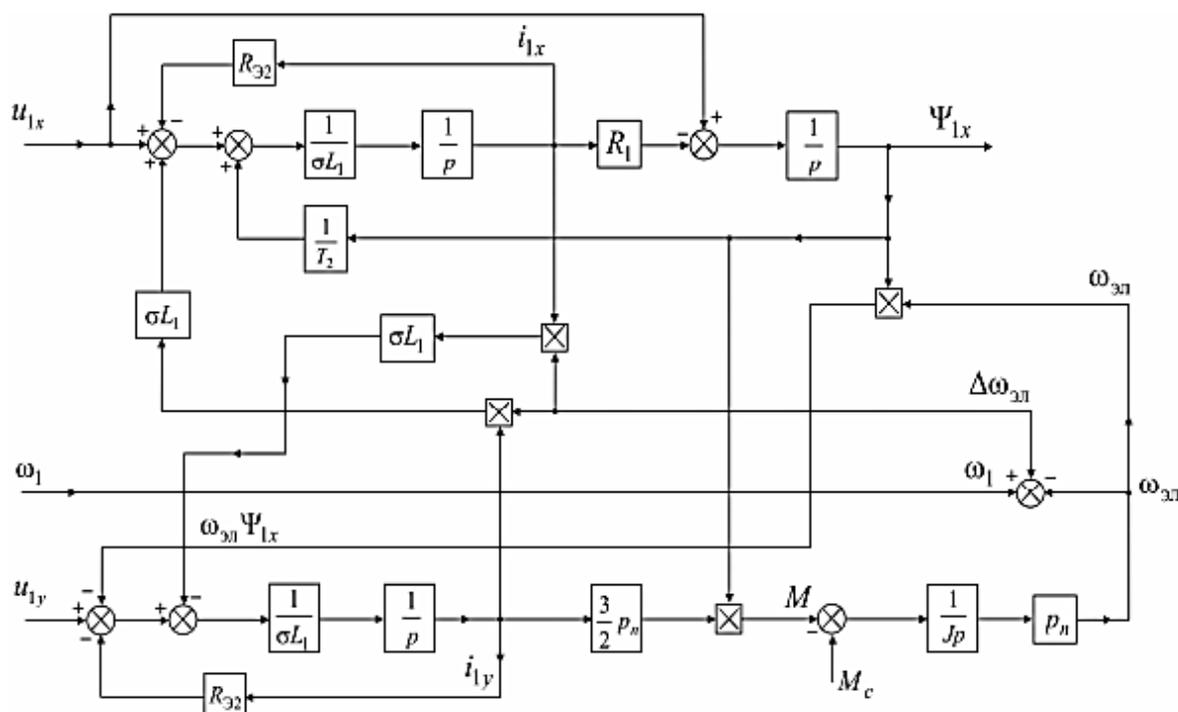


Рисунок 4.4 – Структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя при ориентации оси x вдоль вектора потокосцепления статора Ψ_1

4.2 *Ход работы*

1 Изучить структурные схемы двухфазного асинхронного двигателя в осях x – y при различной ориентации оси x .

2 Смоделировать в системе Simulink модель асинхронного двигателя (см. рисунок 4.1) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

3 Смоделировать в системе Simulink модель асинхронного двигателя (см. рисунок 4.2) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

4 Смоделировать в системе Simulink модель асинхронного двигателя (см. рисунок 4.3) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

5 Получить графики переходных процессов по скорости и моменту для всех моделируемых моделей асинхронного двигателя. Проанализировать их и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1 Что значит ориентация оси x координатных осей x – y по вектору потоко-сцепления или статора ротора? С какой целью выполняется эта операция?

2 Как получены уравнения асинхронного двигателя в осях y – x , в том числе, при различной ориентации оси x .

3 Назовите основные системы координат, используемые в системах векторного управления. Дайте им характеристику.

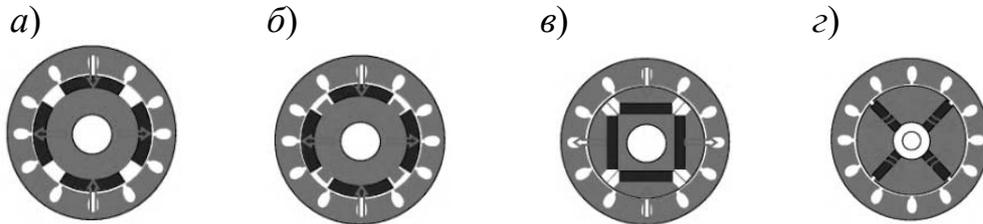
5 Лабораторная работа № 5. Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

Цель работы: изучение структурной схемы СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и структурной схемы системы векторного управления электропривода на основе такого двигателя; реализация модели системы векторного управления электроприводом с СДПМ в среде МАТЛАБ и получение практических навыков её коррекции при типовых настройках системы.

5.1 Общие сведения

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) не имеют электрических потерь в роторе, связанных с формированием магнитного потока ротора. Они находят широкое использование в современных разработках регулируемого электропривода переменного тока вместо асинхронных двига-

телей. СДПМ конструктивно имеют различное исполнение ротора. В зависимости от расположения постоянных магнитов на роторе различают СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе, СДПМ с встроенными магнитами в ротор (рисунок 5.1, магниты более темные элементы конструкции ротора).



a, б – поверхностное расположение магнитов на роторе (PMSM); *в, з* – магниты встроены в ротор (IPMSM)

Рисунок 5.1 – Расположение магнитов в СДПМ

Расположение магнитов существенно влияет на характеристики СДПМ. В зависимости от их расположения при вращении ротора различны расчетные значения магнитных проводимостей в воздушном зазоре от магнитного потока магнитов. Для двигателей с поверхностным расположением магнитов магнитная проводимость рабочего зазора практически не меняется. Соответственно, расчетные значения индуктивностей в моделях двигателя по осям d и q одинаковы. Для двигателей с встроенными магнитами в роторе эти индуктивности различны и они определяют дополнительную (реактивную) составляющую развиваемого двигателем момента.

Уравнения электрического равновесия СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе в осях d – q и выражение момента двигателя имеют вид [1]:

$$U_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega_{эл} \cdot \psi_{1q};$$

$$M = p \cdot [\psi_{1q} \cdot i_{1q}];$$

$$\psi_{1q} = L_{1q} \cdot i_{1q}; \quad \psi_{1q} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \psi_{1m}; \quad U_{1q} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot U_{1m},$$

где L_{1q} – индуктивность по оси q ;

$\omega_{эл}$ – электрическая частота вращения;

p – число пар полюсов;

ψ_{1m} – амплитудное значение фазного потокосцепления;

R_1 – сопротивление;

U_{1m} – амплитудное значение фазного напряжения.

С учетом уравнения движения электропривода и преобразований [1] математическая модель трехфазного СДПМ в осях d - q имеет вид

$$\sqrt{3} \cdot U_1 = R_1 \cdot i_1 + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \sqrt{3}\omega_1 \cdot \psi_1;$$

$$M = p \left[\sqrt{3}\psi_1 \cdot i_1 \right];$$

$$\psi_{1q} = L_1 \cdot i_1; \quad \psi_{1d} = \sqrt{3} \cdot \psi_1;$$

$$\omega_1 = \omega_{эл}; \quad M - M_{cm} = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения трехфазного СДПМ;

ψ_1 – действующее значение фазного потокосцепления трехфазного СДПМ,

$$\psi_1 = \frac{\Psi_{1m}}{\sqrt{2}}.$$

Эти уравнения соответствуют уравнениям ДПТ НВ, где напряжения якоря – это линейное напряжения трехфазного СДПМ, а ток якоря – фазный ток СДПМ

Структурная схема СДПМ, соответствующая этим уравнениям, показана на рисунке 5.2.

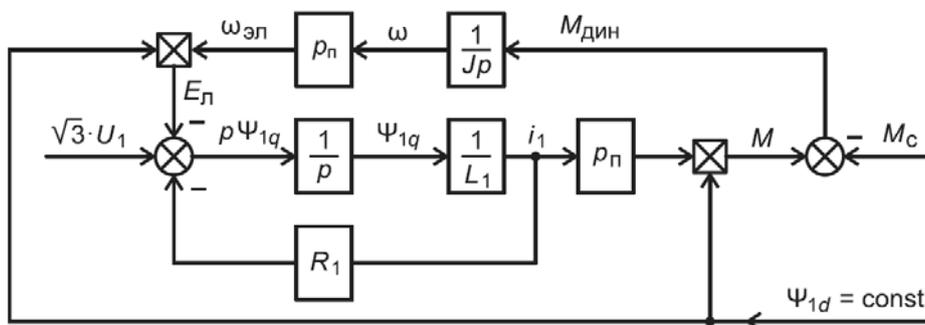


Рисунок 5.2 – Структурная схема СДПМ с встроенными магнитами в ротор

Соответственно, структурная схема модели частотно-регулируемого электропривода на основе СДПМ соответствует структурной схеме электропривода с управляемым выпрямителем и ДПТ НВ, показанной на рисунке 5.3.

На рисунке 5.4 представлена Simulink-модель двухконтурного частотно-регулируемого электропривода переменного тока с СДПМ, с векторным управлением и подчиненным регулированием параметров.

Переменные, описывающие параметры рассматриваемой системы, соответствуют параметрам двигателя в таблице 5.1.

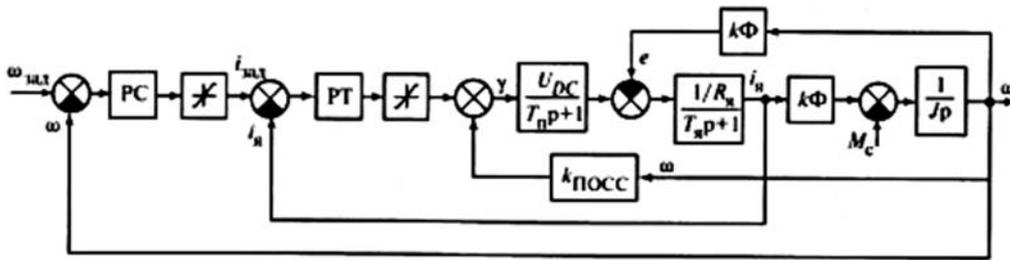


Рисунок 5.3 – Структурная схема модели электропривода УВ-ДПТ НВ с двухконтурной САУ

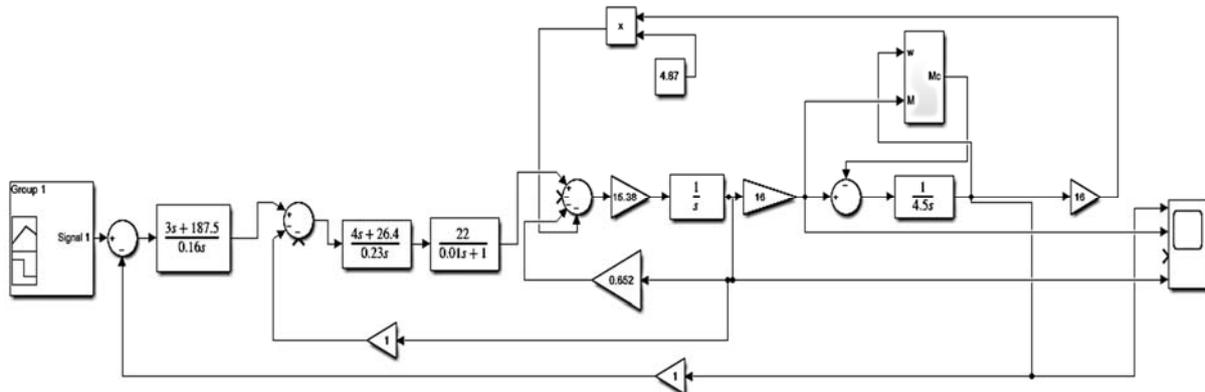


Рисунок 5.4 – Структурная схема электропривода с СДПМ и векторном управлении

Таблица 5.1 – Расчетные параметры СДПМ, использованные при моделировании

J , кг·м	R , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	Lq , Гн	Ld , Гн	Ω_{max} , с ⁻¹	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹
4,5	0,652	710	12,4	3400	0,065	0,041	6,33	4,87	4,88

5.2 Ход работы

1 Изучить структурную схему модели СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе в осях $d-q$.

2 Смоделировать в системе Simulink модель СДПМ (см. рисунок 5.1) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

3 Смоделировать в системе Simulink модель электропривода (см. рисунок 5.3) при различных настройках системы в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

4 Проанализировать полученные результаты и оформить отчет по работе.

Контрольные вопросы

1 Приведите пример механических характеристик СДПМ.

2 Приведите систему уравнений, описывающую СДПМ с постоянными магнитами ротора.

3 Назовите основные системы координат, используемые в системах

векторного управления при описании трехфазных СДПМ. Дайте им характеристику.

6 Лабораторная работа № 6. Моделирование системы векторного управления АД с к. з. ротором при регулируемом потокосцеплении ротора

Цель работы: изучение структурной схемы асинхронного двигателя с к. з. ротором при векторном управлении и регулировании потока и структурной схемы системы векторного управления электропривода на основе такого двигателя с регулированием потока двигателя; реализация модели системы векторного управления электроприводом с АД к. з. ротором и регулированием потока в среде МАТЛАБ и получение практических навыков её коррекции при типовых настройках системы.

6.1 Общие сведения

Уравнения электрического равновесия асинхронного электродвигателя с к. з. ротором при векторном управлении в осях x – y при ориентировании оси x вдоль вектора потокосцепления ротора и выражение момента двигателя имеют вид [1]

$$U_{1x} = R_1 \cdot i_{1x} + L_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} - \omega_1 \cdot L_1 \cdot i_{1y};$$

$$U_{1y} = R_1 \cdot i_{1y} + L_1 \cdot \sigma \cdot \frac{di_{1y}}{dt} + \omega_1 \cdot (L_{1x} \cdot i_{1x} + \Psi_{2x});$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot [\Psi_{2x} \cdot i_{1y} \cdot k_r]; \quad \Psi_{2x} + T_2 \cdot \frac{d\Psi_{2x}}{dt} = L_{12} \cdot i_{1x},$$

где L_{1x} , L_1 , L_{12} – индуктивность рассеяния, индуктивность фазы статора, взаимная индуктивность соответственно;

ω_1 – электрическая частота вращения;

p_n – число пар полюсов;

Ψ_{2x} – потокосцепление ротора;

R_1 – сопротивление статора;

σ – коэффициент рассеяния;

k_r – коэффициент магнитной связи ротора, $k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$;

T_2 – электромагнитная постоянная времени цепи ротора, $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$.

Структурная схема, соответствующая этим уравнениям, показана на рисунке 6.1.

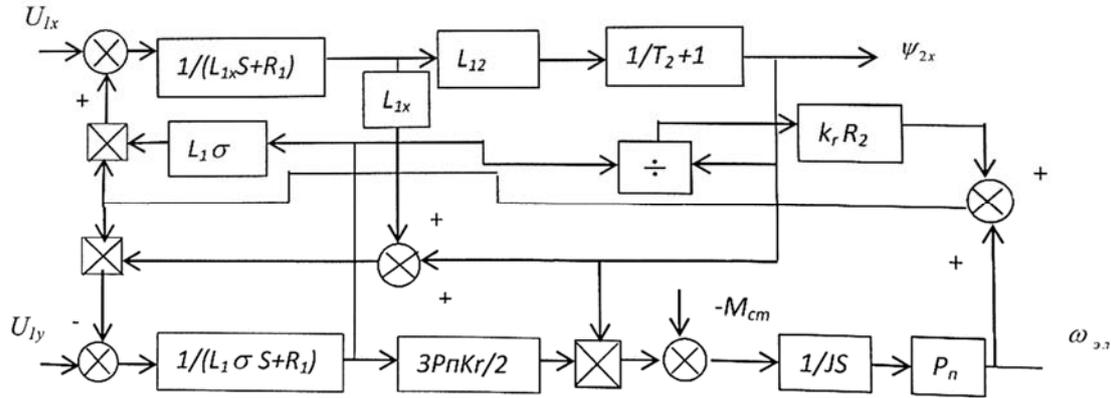


Рисунок 6.1 – Структурная схема асинхронного двигателя с к. з. ротором

На базе этой структурной схемы разработана модель асинхронного электропривода с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной при ослаблении потока двигателя.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления (САУ) электроприводом на базе АД с к. з. ротором, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [5]. Так как номинальное напряжение $U_{ном.}$, формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты U_{dc} и способом реализации ШИМ инвертором, то, например, САУ приводом может быть реализована с учетом ограничения, накладываемого напряжением цепи постоянного тока, питающего инвертор преобразователя частоты, на максимальное фазное напряжение питания асинхронного двигателя в соответствии с условием

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2,$$

где U_s – амплитудное номинальное фазное напряжения двигателя, $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ (U_{dc} – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты).

Структурная схема системы автоматического управления электроприводом в осях x – y , реализующая этот вариант при увеличении скорости регулирования вверх от номинальной, показана на рисунке 6.2. С увеличением задания скорости двигателя выше $\omega_{ном}$ ($\omega_{ном}$ определяет зону нечувствительности элемента, запускающего в работу контур регулирования потока) привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования составляющей тока i_x с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального. При превышении напряжением на двигателе значения U_s вступает в работу обратная связь по напряжению на двигателе, ограничивая составляющую напряжения U_{1y} .

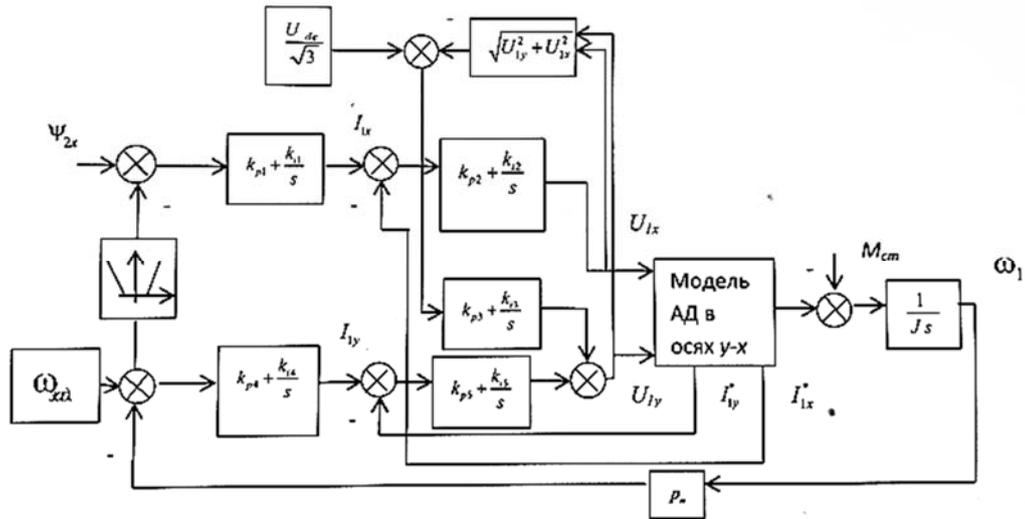


Рисунок 6.2 – Структурная схема САУ электроприводом в осях d – q

Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и скорости и ПИ-регулятором в контуре ограничения напряжения. На основе структурной схемы электропривода (см. рисунок 6.2) имитационная модель электропривода в среде МАТЛАБ показана на рисунке 6.3 для двигателя с параметрами (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Расчетные параметры асинхронного двигателя использованные при моделировании

J , кг·м ²	R_1 , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L_{12} , Гн	L_{1x} , Гн	R_2 , Ом	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹	$U_{ф}$, В
4,5	2,47	310	11,87	4071	0,979	0,219	1,82	4,36	12,1	208

Блок задания скорости Signal Bilder 5 формирует требуемую тахограмму движения привода, обеспечивающую увеличение скорости привода на 20 % [5]. На схеме блок Step3 формируют команду на начало режима работы с контролем напряжения на двигателе. В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточными функциями, указанными на рисунке 6.3.

6.2 Ход работы

- 1 Изучить структурную схему АД с к. з. ротором в осях y – x .
- 2 Смоделировать в системе Simulink модель АД с к. з. ротором (см. рисунок 6.1) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.
- 3 Смоделировать в системе Simulink модель электропривода (см. рисунок 6.3) при настройках системы в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.
- 4 Проанализировать полученные результаты и оформить отчет по работе.

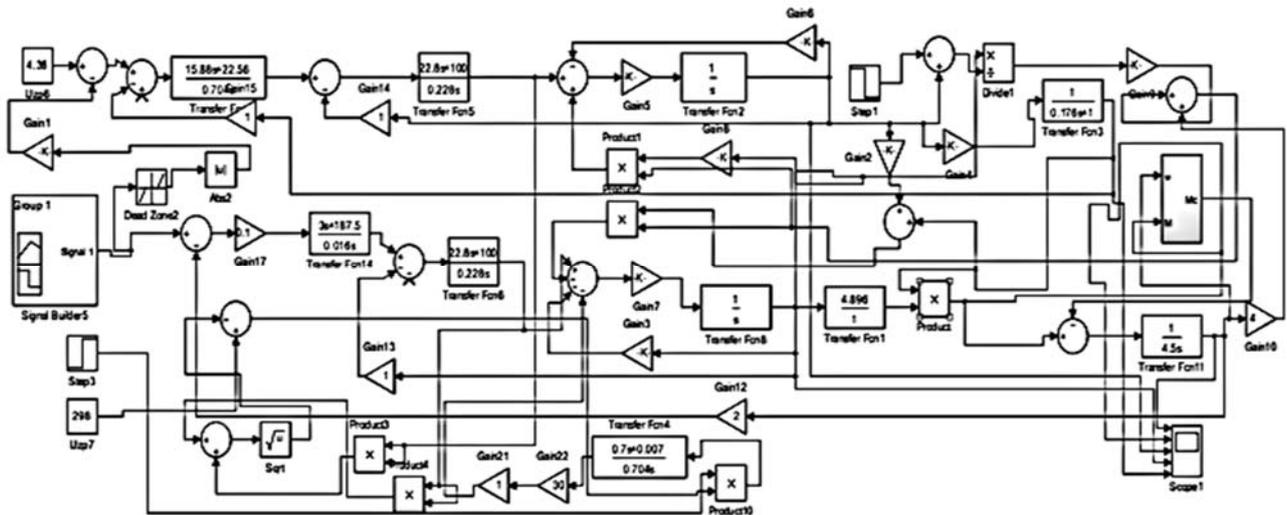


Рисунок 6.3 – Модель электропривода на основе АД с к. з. ротором и ослаблением потока двигателя

Контрольные вопросы

- 1 Что значит ориентация оси x координатных осей x – y по вектору потока-сцепления или статора ротора? С какой целью выполняется эта операция?
- 2 Поясните принцип работы электропривода по рисунку 6.2.
- 3 Назовите основные системы координат, используемые в системах векторного управления. Дайте им характеристику.
- 4 Приведите семейство механических характеристик АД с к. з. ротором при ослаблении потока двигателя.

7 Лабораторная работа № 7. Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при регулировании потокосцепления ротора

Цель работы: изучение структурной схемы СДПМ с встроенным расположением магнитов в роторе и структурной схемы системы векторного управления электропривода на основе такого двигателя с регулированием потока двигателя; реализация модели системы векторного управления электроприводом с СДПМ при регулировании потока двигателя в среде МАТЛАБ и получение практических навыков её коррекции при типовых настройках системы.

7.1 Общие сведения

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) не имеют электрических потерь в роторе, связанных с формированием магнитного потока ротора. Они находят широкое использование в современных разработках регулируемого электропривода переменного тока.

Основным режимом работы СДПМ является область скоростей до номинальной при постоянном допустимом по нагреву моменте. В этой области регулирования скорости составляющая тока двигателя по продольной оси d равна нулю. Момент двигателя определяется составляющей тока по оси q . Если обеспечить режим работы, при котором составляющая тока по оси d отрицательна при сохранении напряжения на двигателе на уровне номинального, то происходит ослабление потока СДПМ (составляющая тока двигателя по оси d обеспечивает действие продольной размагничивающей реакции якоря подобно работе ДПТ НВ при сдвиге щеток с геометрической нейтрали) и, как следствие, увеличение скорости двигателя выше номинальной (регулирование скорости во второй зоне при постоянстве мощности потребляемой двигателем). Диапазон регулирования скорости существенно зависит от размещения магнитов на роторе двигателя. СДПМ с поверхностным размещением магнитов позволяют реализовать диапазон до 1 к 2 при сохранении теплового режима работы. СДПМ со встроенным расположением магнитов обеспечивают существенно большие диапазоны.

Уравнения электрического равновесия СДПМ в осях d - q (соответствует СДПМ с встроенным расположением магнитов в роторе) и выражение момента двигателя имеют вид [1]:

$$U_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} + L_{1d} \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_{эл} \cdot L_{1q} \cdot i_{1q};$$

$$U_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + L_{1q} \cdot \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_{эл} \cdot (L_{1d} \cdot i_{1d} + \psi_m);$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi_m \cdot i_{1q} - (L_{1q} - L_{1d}) \cdot i_{1q} \cdot i_{1d}],$$

где L_{1d}, L_{1q} – индуктивности двигателя по соответствующим осям;

$\omega_{эл}$ – электрическая частота вращения;

p – число пар полюсов;

ψ_m – амплитудное значение потокосцепления;

R_1 – сопротивление.

Структурная схема СДПМ, соответствующая этим уравнениям, показана на рисунке 7.1.

На базе этой структурной схемы может быть разработана модель электропривода с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной за счет ослабления потока СДПМ.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления электроприводом на базе СДПМ, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [4]. Например, САУ приводом может быть реализована с контролем ограничения напряжения, формируемого на двигателе в соответствии с

условием

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2,$$

где U_s – амплитудное значение номинального напряжения двигателя, $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ (U_{dc} – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты).

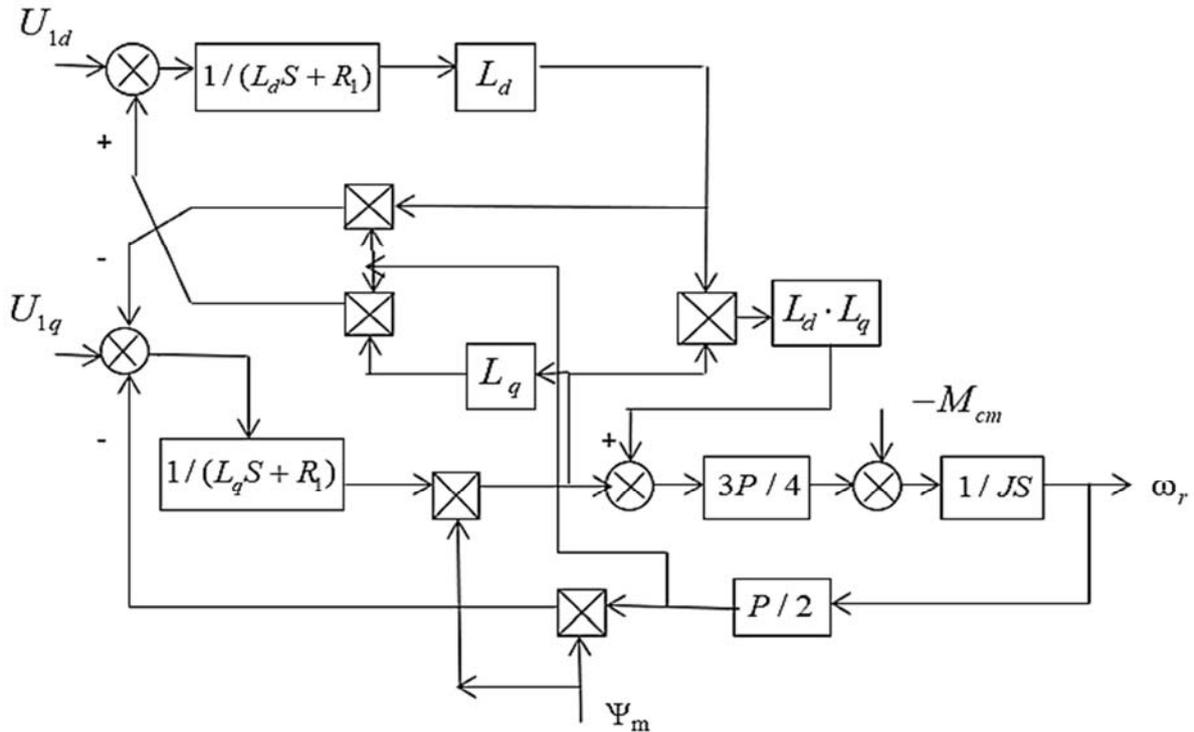


Рисунок 7.1 – Структурная схема СДПМ со встроенными магнитами в ротор

С увеличением скорости двигателя выше $\omega_{ном}$ при превышении напряжением на двигателе значения U_s привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования отрицательной составляющей тока i_d с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального.

Структурная схема системы автоматического управления (САУ) электроприводом в осях d – q , реализующая этот вариант, показана на рисунке 7.2 (блок voltage decoupling – компенсация перекрестных связей).

Номинальное напряжение, формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты U_{dc} и способом реализации ШИМ инвертором. При увеличении скорости задания выше номинальной и соответствующем увеличении напряжения U на двигателе (U больше номинального значения) вступает в работу контур ограничения напряжения на двигателе, задающий отрицательную составляющую тока i_d формирующего поток двигателя. Привод переходит в режим работы регулирования (ослабление) потока машины с контролем перегрузки по току и поддержанием напряжения на двигателе, не превышающем $U_{ном}$. Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регули-

рования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и скорости и ПИ-регулятором в контуре поддержания напряжения.

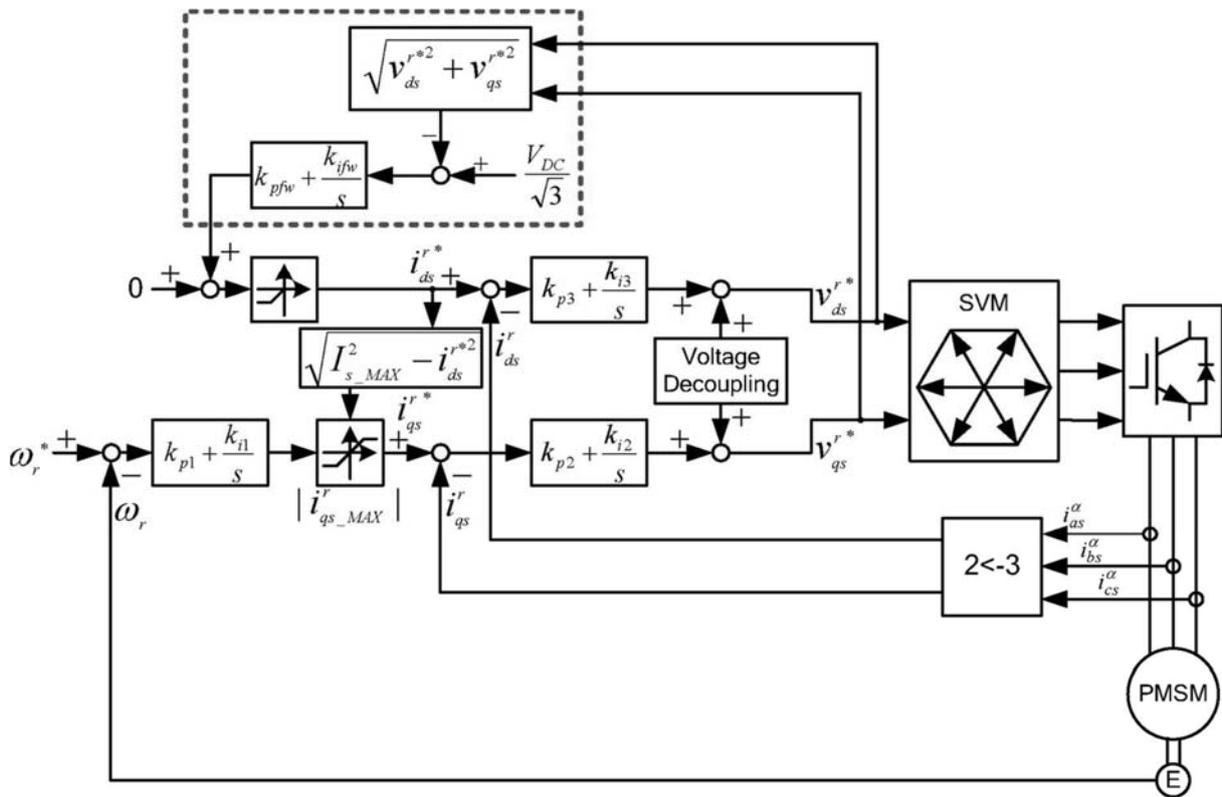


Рисунок 7.2 – Структурная схема САУ электроприводом в осях $d-q$

На основе структурной схемы электропривода (см. рисунок 7.2) разработана в среде МАТЛАБ имитационная модель электропривода (рисунок 7.3). При моделировании использован СДПМ с расчетными параметрами, приведенными в таблице 7.1.

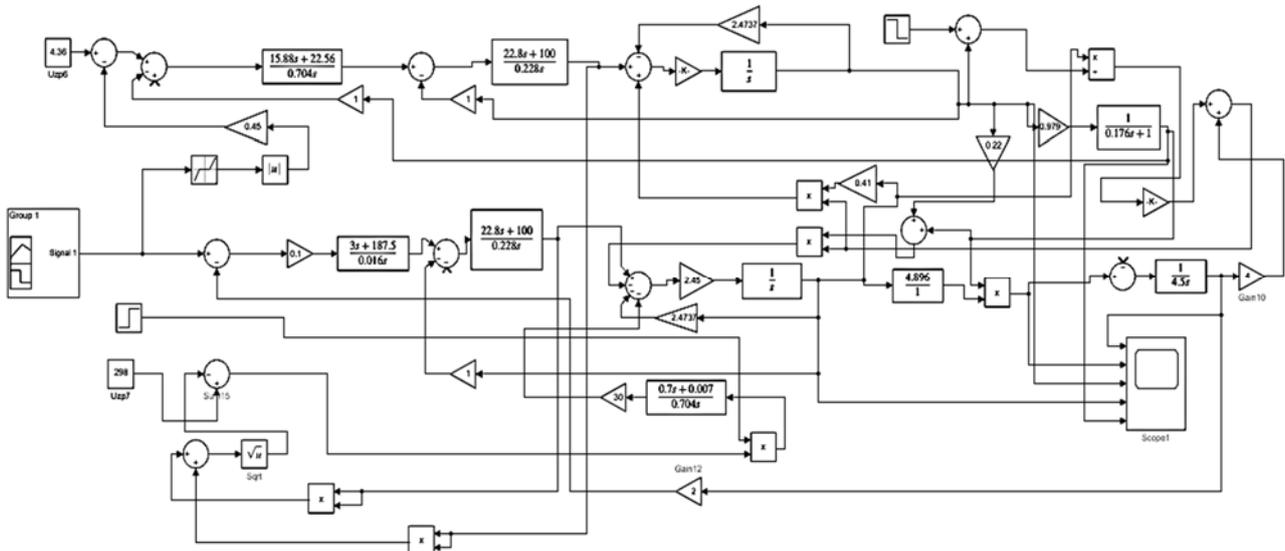
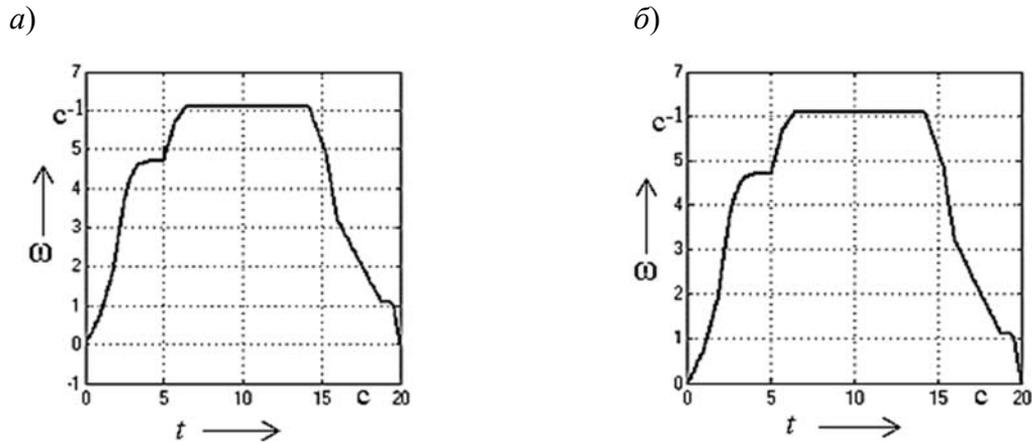


Рисунок 7.3 – Имитационная модель электропривода с СДПМ и регулированием потока

Таблица 7.1 – Расчетные параметры СДПМ, использованные при моделировании

J , кгм	R , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L_q , Гн	L_d , Гн	Ω_{max} , с ⁻¹	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹
4,5	0,652	710	12,4	3400	0,065	0,041	6,33	4,87	4,88

В качестве примера результаты моделирования работы электропривода показаны на рисунках 7.4–7.7.



a – тахограмма задания скорости; *б* – тахограмма скорости на модели

Рисунок 7.4 – Графики

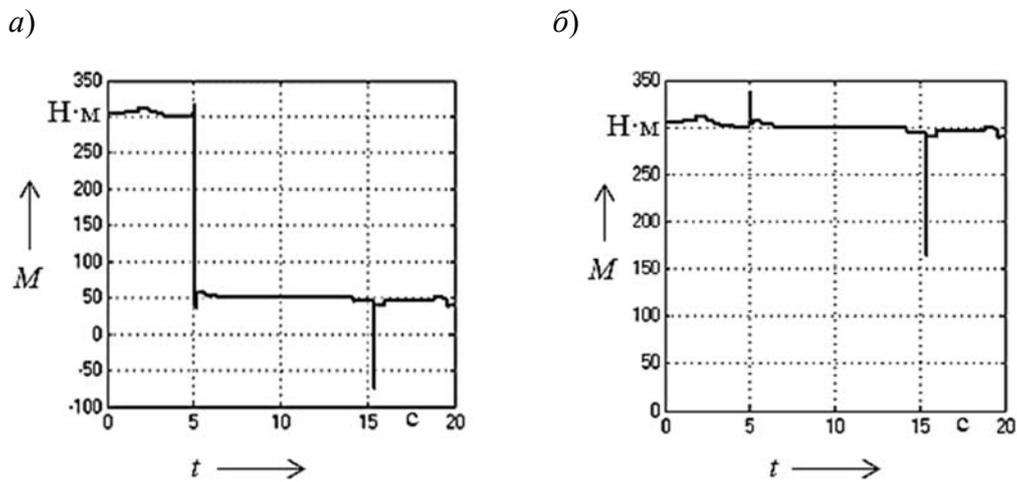
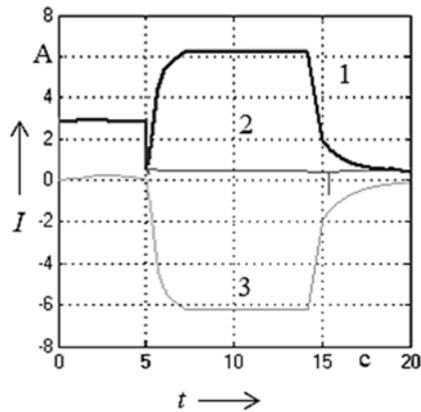
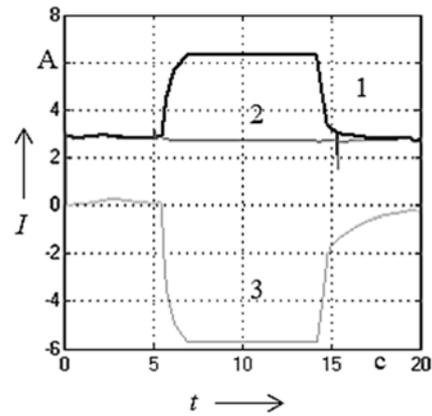


Рисунок 7.5 – Графики момента при пуске ($M_c = 300$ Н·м) и в режиме регулирования потока при $M_c = 50$ Н·м (*a*) и при $M_c = 300$ Н·м (*б*)

а)



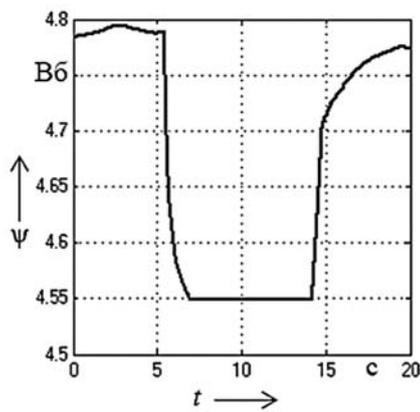
б)



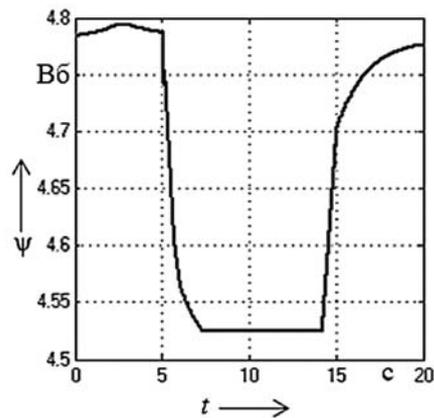
а – при $M_c = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (I – ток статора; 2 – составляющая тока I_q ; 3 – составляющая тока I_d);
 б – при $M_c = 300 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (I – ток статора; 2 – составляющая тока I_q ; 3 – составляющая тока I_d)

Рисунок 7.6 – Графики изменения тока двигателя

а)



б)



а – при $M_c = 300 \text{ Н}\cdot\text{м}$; б – при $M_c = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Рисунок 7.7 – Графики регулирования потока двигателя

7.2 Ход работы

1 Изучить структурную схему СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе в осях $d-q$.

2 Смоделировать модель СДПМ (см. рисунок 7.1) в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

3 Смоделировать модель электропривода (см. рисунок 7.3) при настройках системы в соответствии с данными варианта, выдаваемого преподавателем.

4 Проанализировать полученные результаты и оформить отчет по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните работу привода по рисунку 7.2.
- 2 Достоинства и недостатки трехфазных СДПМ.
- 3 Назовите основные системы координат, используемые в системах векторного управления. Дайте им характеристику.

Список литературы

- 1 **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
- 2 **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- 3 **Абабурко, В. Н.** Векторное управление электродвигателями переменного тока / В. Н. Абабурко, А. В. Шваяков. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 38 с.
- 4 **Коваль, А. С.** Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока / А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 121–129.
- 5 **Коваль, А. С.** Модель безредукторного электропривода лифта на базе низкоскоростного асинхронного двигателя с регулированием потока / А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2. – С. 42–49.