

Шохин В.В., Храмшин В.Р., Корнилов Г.П., Пермякова О.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В работе ставится задача создать модель структурной схемы системы векторного управления асинхронным двигателем с частотным регулированием скорости, в которой осуществляется преобразование координат. Используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink Matlab. Питание двигателя осуществляется от преобразователя частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией. Система регулирования скорости построена с использованием принципов подчиненного регулирования координат электропривода. Для анализа работы электроприводов с векторным управлением принят метод структурного моделирования. Преимущество представленной модели заключается в использовании виртуальных моделей асинхронных двигателей из библиотеки Simulink. Это существенно упрощает процесс моделирования и представляет большие возможности для исследователей. В этом случае при исследовании электроприводов необходимо только задать основные параметры исследуемого двигателя. Имеется возможность учесть кривую намагничивания электротехнической стали. Для измерения переменных двигателя предусмотрен специальный блок, в котором может быть выведено большое количество переменных состояния электрической машины. Рассмотрение двигателя по такой модели приводит к структурной схеме двигателя без упрощений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей по каналам регулирования потокосцепления и момента. Созданы блоки, в которых осуществляется преобразование трехфазной системы токов статора в двухфазную систему в неподвижной системе координат. Затем эта двухфазная система преобразуется в двухфазную систему координат, вращающуюся со скоростью поля статора с ориентацией вещественной оси по вектору потокосцепления ротора. Выходные координаты этого блока используются в качестве сигналов обратной связи по составляющим тока статора, пропорциональным потокосцеплению и электромагнитному моменту двигателя. Создается система подчиненного регулирования координат электропривода для регулирования скорости. Выходом этой системы регулирования являются сигналы задания напряжения, представленные в двухфазной системе координат, вращающейся со скоростью поля двигателя. Эти сигналы преобразуются в двухфазную неподвижную систему координат, а затем в трехфазную систему задающих сигналов для преобразователя частоты. Представленная структура модели электропривода переменного тока дает значительные возможности исследователям при анализе работы электроприводов переменного тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, преобразователь частоты, неподвижная и вращающаяся системы координат, структурное моделирование, подчиненное регулирование координат, широтно-импульсная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Системы векторного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором широко применяются в современных электроприводах переменного тока с частотным регулированием скорости двигателей [1-9]. В таких системах описание асинхронного двигателя проводится в различных системах координат, при этом распространено использование неподвижной системы координат, связанной со статором двигателя, и системы, вращающейся со скоростью поля статора. Вводится понятие обобщенных векторов токов, напряжений, потокосцеплений. Преимущественно применяют системы, в которых вещественная ось вращающейся системы координат направлена по вектору потокосцепления ротора. При построении систем регулирования необходимы вычислительные блоки с целью проведения преобразований переменных двигателя в различные системы координат. Регулирование скорости осуществляется с использованием принципов подчиненного регулирования координат электропривода. Питание двигателей осуществляется от преобразователей частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией.

При анализе систем векторного управления используют допущение, заключающееся в том, что считают скомпенсированными перекрестные связи между двумя каналами структурной схемы двигателя – каналом

составляющей тока статора, пропорциональной моменту двигателя, и каналом составляющей тока статора, пропорциональной потокосцеплению двигателя. Такое представление структурной схемы существенно упрощает расчет регуляторов и создание моделей систем векторного управления. Фактически структура получается такой же, как и в электроприводах постоянного тока. Но такие структуры не позволяют анализировать переменные двигателя (фазные токи, напряжения), являющиеся системами трехфазного переменного тока. В этом случае преобразователь частоты представляется аperiodическим звеном, а трехфазная система переменного тока из рассмотрения фактически исключается.

В работе ставится задача создать модель структурной схемы системы векторного управления, в которой используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink, которая подключается к модели преобразователя частоты со звеном постоянного тока с инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Созданы блоки, в которых осуществляется преобразование трехфазной системы токов статора в двухфазную систему в неподвижной системе координат. Затем эта двухфазная система преобразуется в двухфазную систему координат, вращающуюся со скоростью поля статора с ориентацией вещественной оси по вектору потокосцепления ротора. Выходные координаты этого блока используются в качестве сигналов обратной связи по составляющим тока статора, пропорциональным потокосцеплению и электромагнитному моменту двигателя.

Преимущество представленной модели заключается в использовании виртуальных моделей асинхронных двигателей из библиотеки Simulink. Это существенно упрощает процесс моделирования и представляет большие возможности для исследователей. В этом случае при исследовании электроприводов необходимо только задать основные параметры исследуемого двигателя. Имеется возможность учесть кривую намагничивания электротехнической стали. Для измерения переменных двигателя предусмотрен специальный блок, в котором может быть выведено большое количество переменных состояния электрической машины. Рассмотрение двигателя по такой модели приводит к структурной схеме двигателя без упрощений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей по каналам регулирования потокосцепления и момента.

Создается система подчиненного регулирования координат электропривода для регулирования скорости [1]. Выходом этой системы регулирования являются сигналы задания напряжения, представленные в двухфазной системе координат, вращающейся со скоростью поля двигателя. Эти сигналы надо преобразовать в двухфазную неподвижную систему координат, а затем в трехфазную систему задающих сигналов для преобразователя частоты.

Такая структура модели электропривода переменного тока в максимальной степени приближается к реальной структуре системы векторного управления при частотном регулировании скорости асинхронного двигателя.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время для исследования сложных электромеханических систем широко используется метод структурного моделирования [10-19]. Исследование работы системы частотного регулирования ско-

рости электропривода переменного тока проводилось путем моделирования в программной среде Matlab с приложением Simulink [10-13].

Функциональная схема силовой части модели приведена на **рис. 1**. В модели использовано представление асинхронного двигателя из библиотеки Simulink (рассмотрен двигатель с параметрами: мощность 5,5 кВт, напряжение 380 В, номинальная частота 50 Гц, номинальная скорость вращения 1460 об/мин, сопротивление и индуктивность статорной цепи – 0,6419 Ом, 0,00475 Гн, сопротивление и индуктивность роторной цепи – 0,6059 Ом, 0,0076 Гн, индуктивность цепи намагничивания 0,173 Гн, момент инерции 0,017 кг·м²). Создана модель силовой схемы преобразователя частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией. Выпрямитель представляет собой трехфазную схему выпрямления. Автономный инвертор напряжения собран на элементах IGBT. Система управления инвертором формирует импульсы управления с изменяющейся скважностью в соответствии с примененной системой широтно-импульсной модуляции.

Блоки преобразования координат построены в соответствии с известными математическими зависимостями [1], представленными ниже.

При составлении уравнений системы координат обозначены следующим образом:

x - y – неподвижная прямоугольная система координат, жестко связанная с трехфазной статорной обмоткой, ее вещественная ось направлена по оси обмотки фазы А статора. Переменные в этой системе координат имеют индексы x , y ;

α - β – система координат, вращающаяся с угловой скоростью, равной угловой частоте напряжения питания двигателя. Переменные в этой системе координат имеют индексы α , β .

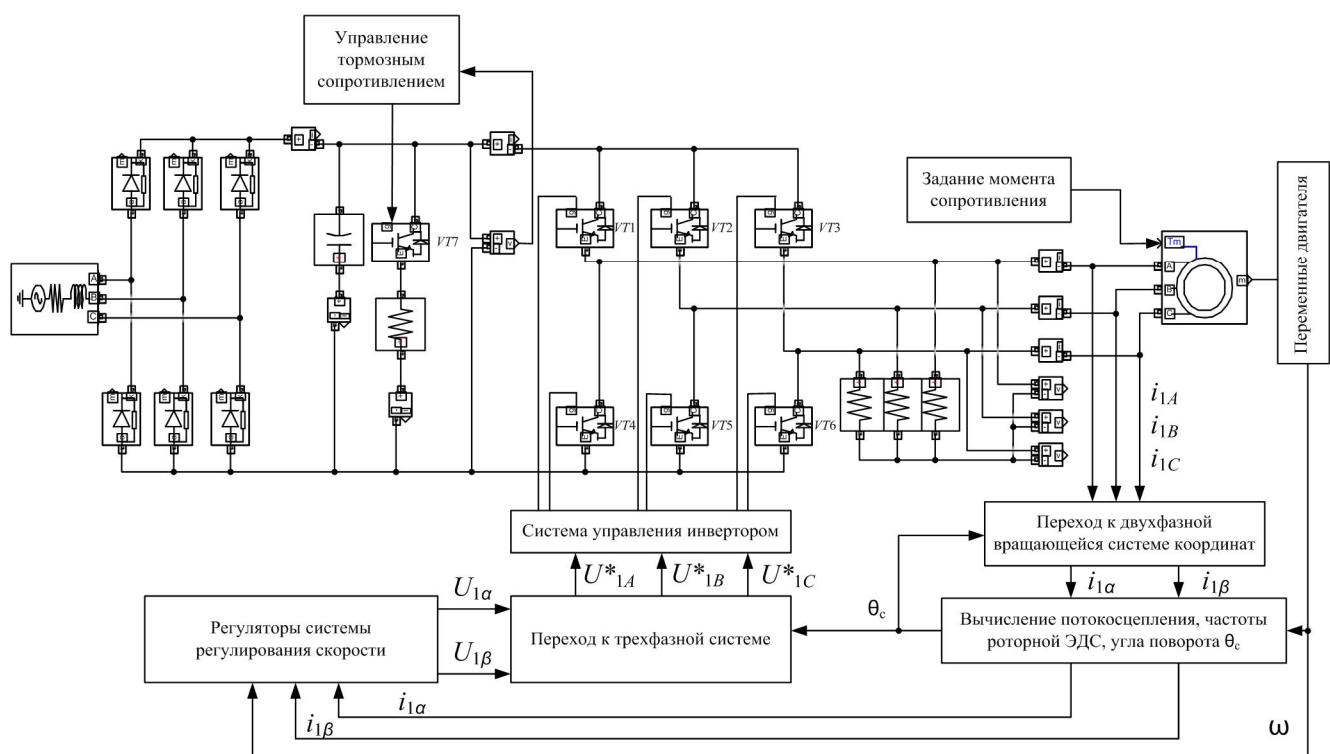


Рис. 1. Функциональная схема модели автоматизированного электропривода с векторным управлением

Мгновенное значение угла поворота этой системы относительно неподвижной системы координат обозначается углом θ_c .

Знак «^» над обозначением переменной говорит о том, что это расчетное значение переменной.

Переход от трехфазной системы токов i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} к двухфазной i_{1x} , i_{1y} в неподвижной системе координат выполняется по формулам:

$$i_{1x}=i_{1A}, \quad i_{1y}=\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1B}-i_{1C}).$$

Для преобразования двухфазной системы токов в неподвижной системе координат в двухфазную вращающуюся используются выражения:

$$i_{1\alpha}=i_{1x}\cos\theta_c+i_{1y}\sin\theta_c;$$

$$i_{1\beta}=-i_{1x}\sin\theta_c+i_{1y}\cos\theta_c.$$

Регуляторы системы рассчитаны с учетом теории систем подчиненного регулирования координат [1]. Передаточные функции регуляторов представлены в [3].

Регуляторы тока определяются в соответствии с выражением

$$W_{\text{рт}}(p)=\frac{(\sigma T_1 p+1)R_1}{2T_{\mu 1}k_{\text{н}}k_{\text{дт}}p};$$

$$\sigma=1-\frac{L_m^2}{(L_1 L_2)},$$

где T_1 – электромагнитная постоянная времени статорной обмотки; R_1 – активное сопротивление статорной обмотки; $T_{\mu 1}$ – минимальная некомпенсируемая постоянная времени в контуре тока; $k_{\text{н}}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты по напряжению; $k_{\text{дт}}$ – коэффициент датчика тока; L_m – индуктивность контура намагничивания; L_1 – индуктивность обмотки статора; L_2 – индуктивность обмотки ротора.

Регулятор скорости при настройке по модульному оптимуму должен быть пропорциональным

$$W_{\text{рс}}(p)=k_{\text{рс}}=\frac{k_{\text{дт}}J}{4T_{\mu 1}k_{\text{дс}}3p_{\text{н}}k_2\psi_2};$$

$$k_2=\frac{L_m}{L_2},$$

где $k_{\text{рс}}$ – коэффициент регулятора скорости; $k_{\text{дс}}$ – коэффициент датчика скорости; ψ_2 – величина потокосцепления ротора.

Если применить настройку по симметричному оптимуму, то регулятор скорости будет иметь пропорционально-интегральную передаточную функцию

$$W_{\text{рс}}(p)=k_{\text{рс}}\frac{8T_{\mu 1}+1}{8T_{\mu 1}}.$$

Передаточная функция регулятора потокосцепления рассчитывается по формуле

$$W_{\text{рп}}(p)=\frac{k_{\text{дт}}(T_2 p+1)}{4T_{\mu 1}p k_{\text{дп}}L_m},$$

где $k_{\text{дп}}$ – коэффициент цепи обратной связи по потокосцеплению.

Для формирования трехфазной системы задающих напряжений в неподвижной системе координат на входе преобразователя частоты из двухфазной системы напряжений во вращающейся системе координат на выходе регуляторов системы регулирования скорости приняты соотношения [1]:

$$U_{1x}^*=U_{1\alpha}^*\cos\theta_c-U_{1\beta}^*\sin\theta_c;$$

$$U_{1y}^*=U_{1\alpha}^*\sin\theta_c+U_{1\beta}^*\cos\theta_c;$$

$$U_{1A}^*=U_{1x}^*; \quad U_{1i}^*=-\frac{1}{2}(U_{1x}^*-\sqrt{3}U_{1y}^*);$$

$$U_{1C}^*=-\frac{1}{2}(U_{1x}^*+\sqrt{3}U_{1y}^*).$$

Значения потокосцепления ротора и частота роторной ЭДС определяются по выражениям [3]:

$$\hat{\Psi}_2=\frac{L_m}{(T_2 p+1)}i_{1\alpha};$$

$$\hat{\omega}_p=\frac{k_2 R_2 i_{1\beta}}{\hat{\Psi}_2}=\frac{L_m i_{1\beta}}{T_2 \hat{\Psi}_2};$$

$$T_2=\frac{L_2}{R_2};$$

$$k_2=\frac{L_m}{L_2};$$

$$\hat{\omega}_{0\text{эл}}=\omega p_{\text{н}}+\hat{\omega}_p.$$

В модели рассчитывается текущее значение угла поворота θ_c путем интегрирования частоты вращения $\hat{\omega}_{0\text{эл}}$ и значение электромагнитного момента двигателя \hat{M}_d :

$$\hat{M}_d=3p_{\text{н}}k_2\hat{\Psi}_2i_{1\beta}.$$

В модели создан блок для моделирования активной и реактивной нагрузки для двигателя. В этом блоке реактивный момент сопротивления формируется в зависимости от наличия скорости двигателя и направления вращения.

Для создания тормозных режимов двигателя в силовой схеме предусмотрен тормозной блок, включающий IGBT-ключ и резистор. Управление ключом осуществляется в зависимости от напряжения в звене постоянного тока преобразователя. Включение ключа производится при напряжении в звене постоянного тока 788 В, отключение – при 780 В.

Для контроля напряжения на конденсаторе в силовой схеме и его тока заряда, тока инвертора и тока через тормозной резистор, а также тока выпрямителя использованы датчики, сигналы которых осциллографируются. В силовой схеме установлены также датчики токов и напряжений в трехфазной системе выходных токов инвертора. Задание скорости подается в систему регулирования, при разгоне и торможении используется линейное изменение сигнала задания. Установлен блок задания статической нагрузки. Скорость двигателя, электромагнитный момент контролируются по выходным данным модели двигателя.

Функциональная схема полной модели векторного управления при частотном регулировании скорости асинхронного двигателя с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потокоцепления ротора с блоками преобразования координат представлена на **рис. 1**.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Первоначально для определения исходных динамических характеристик электропривода проводилось исследование работы электродвигателя при его прямом подключении к идеальному источнику питания с полным напряжением и частотой 50 Гц. Осциллограммы переходных процессов приведены на **рис. 2, а**, где показана также динамическая механическая характеристика двигателя, полученная в процессе разгона (**рис. 2, б**). Для рассматриваемого электродвигателя характер переходных процессов существенно колебательный, так как двигатель представляет собой колебательное звено с нелинейными свойствами.

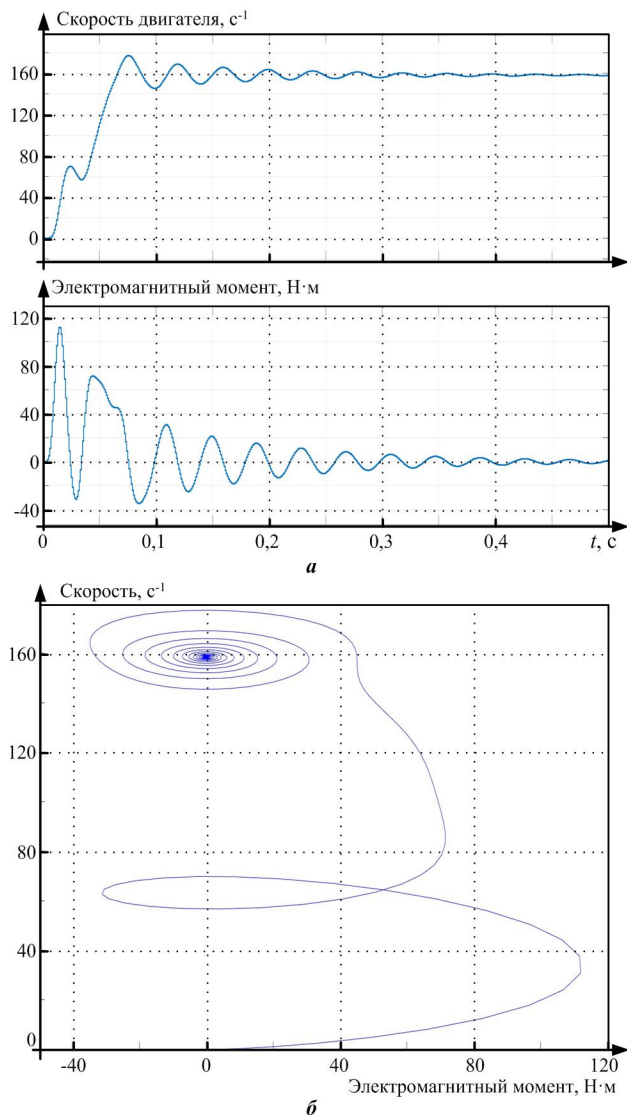


Рис. 2. Переходные процессы при прямом включении двигателя на сеть (**а**) и динамическая механическая характеристика двигателя (**б**)

Исследовался автоматизированный электропривод с векторным управлением с системой подчиненного регулирования координат. Включение привода производится в следующей последовательности. В начале расчета подается сигнал задания потокоцепления с увеличением до заданного значения в течение 0,025 с. Затем в момент времени 0,1 с начинает линейно увеличиваться напряжение задания скорости. Такой порядок необходим для предварительного задания потокоцепления двигателя. В период времени с 0,25 до 0,3 с действует активный момент сопротивления. При наличии скорости действует реактивный момент сопротивления.

При проведении исследований на модели цепи обратной связи по переменным электропривода представлялись с единичным коэффициентом передачи. Поскольку в соответствии с теорией систем подчиненного регулирования значения этих коэффициентов входят в передаточные функции регуляторов с целью приведения передаточных функций замкнутых контуров к нормированным передаточным функциям, при таком допущении упрощается расчет системы, и это не влияет на качество динамических и статических характеристик. После расчета элементов модели проводилась установка расчетных параметров. В связи с тем, что при расчете регуляторов структура объекта представляется упрощенно с определенной степенью допущений, проводилась дополнительная подстройка системы регулирования с целью получения заданных динамических и статических свойств.

На **рис. 3** представлена осциллограмма работы электропривода при разгоне двигателя, набросе и сбросе нагрузки, торможении и реверсе двигателя, торможении до полной остановки. В расчете учитывается действие и активного, и реактивного момента сопротивления (момента трения). Значения моментов задаются на уровне: активный – 20 Н·м в период с 0,3 до 0,5 с, реактивный – 10 Н·м на всем периоде изменения скорости двигателя, при этом изменение направления момента происходит при изменении направления скорости.

Характер переходных процессов вполне удовлетворительный. Статическая просадка скорости двигателя при действии активного момента отсутствует, так как применен пропорционально-интегральный регулятор скорости. При реверсе двигателя происходит изменение чередования фазных напряжений.

На **рис. 4, а** показаны изменения скорости двигателя, напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока, тока через тормозной резистор. Подключение тормозного резистора происходит периодически в зависимости от величины напряжения на конденсаторе. Это обеспечивает торможение двигателя с рассеиванием энергии торможения в виде тепла тормозного резистора и ограничение напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне.

Формирование напряжений управления на выходе системы регулирования скорости (на входе преобразователя частоты) показано на осциллограмме **рис. 4, б**. Данная система трехфазных управляющих напряжений сравнивается с пилообразным напряжением системы широтно-импульсной модуляции, тем самым обеспечивается регулирование выходного напряжения преобразователя частоты.

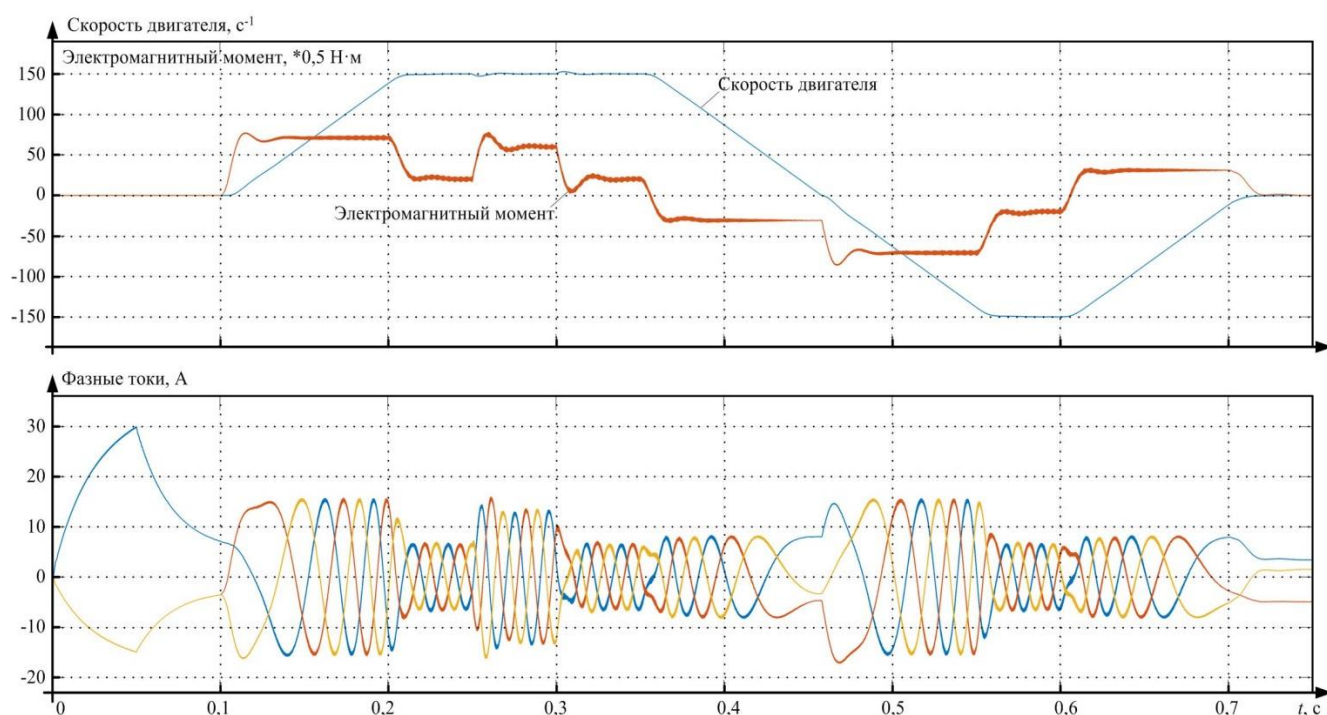


Рис. 3. Осциллограммы работы электропривода (скорость двигателя, электромагнитный момент, фазные токи)

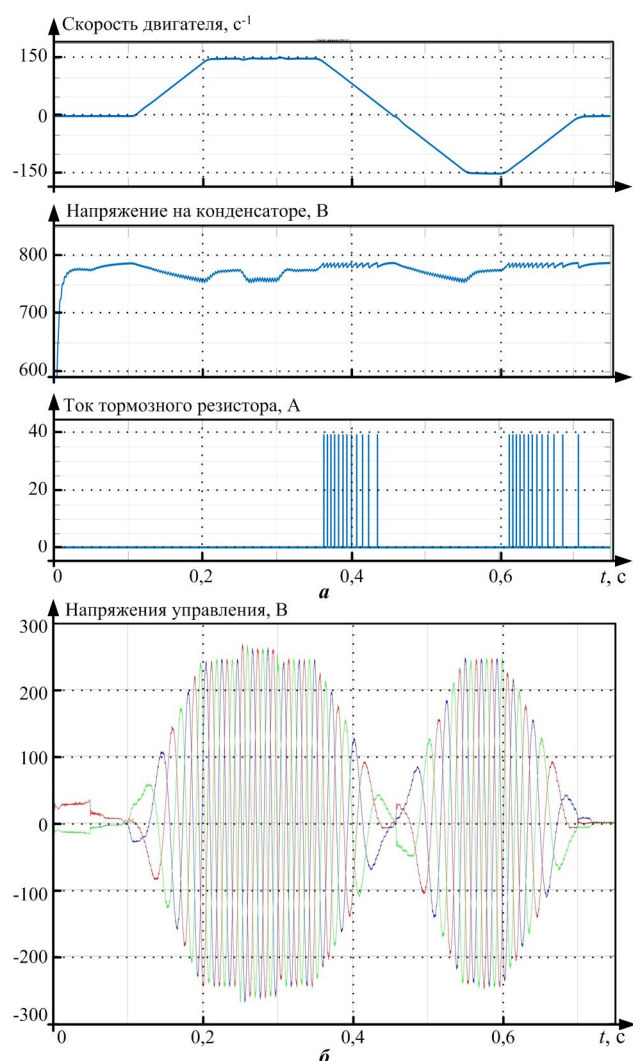


Рис. 4. Осциллограммы скорости, напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока и тока тормозного резистора (а) и напряжений управления на входе преобразователя частоты (б)

На рис. 5, а показаны осциллограммы фазных напряжений на двигателе при разгоне двигателя до номинальной скорости. Работу широтно-импульсной модуляции при регулировании фазных напряжений иллюстрирует осциллограмма на рис. 5, б.

На рис. 6 показаны осциллограммы токов в силовой схеме преобразователя частоты, напряжение на конденсаторе силовой схемы и составляющие тока статора по осям α и β и угол θ .

При работе двигателя напряжение на конденсаторе изменяется в пределах от 754 до 788 В. Росту напряжения при торможении двигателя препятствует периодическое подключение тормозного резистора. Ток выпрямителя имеет только одно направление. За счет этого тока в конечном итоге создается электромагнитный момент двигателя, а также происходит подзарядка конденсатора. Ток инвертора изменяет свое направление в зависимости от режима работы двигателя. Ток через конденсатор также меняет направление при его заряде и разряде.

Составляющая тока статора по оси α пропорциональна потокоцеплению двигателя и при его работе практически не меняется (за исключением значительного изменения только при включении модели в работу, когда устанавливается первоначальное потокоцепление перед разгоном двигателя). Составляющая тока по оси β пропорциональна электромагнитному моменту двигателя и форма этого тока повторяет форму кривой электромагнитного момента. Указанные составляющие тока статора используются в качестве сигналов обратной связи в системе регулирования скорости. На рис. 6, б показано изменение расчетного значения угла θ , используемого в уравнениях преобразования координат.

Осциллограмма на **рис. 7** иллюстрирует изменения составляющих тока статора в неподвижной системе координат. Эти составляющие представляют собой периодически изменяющиеся переменные величины во времени в отличие от составляющих тока статора во вращающейся системе координат (**рис. 6, б**), которые могут быть представлены в виде постоянных по характеру токов.

Таким образом, доказана работоспособность модели, ее широкие возможности при исследованиях электропривода переменного тока при частотном регулировании скорости в различных режимах. Показано, что использование системы векторного управления для принятого асинхронного двигателя с существенно нелинейными свойствами, который представляет собой колебательное звено, позволяет получить электропривод с хорошими статическими и динамическими характеристиками.

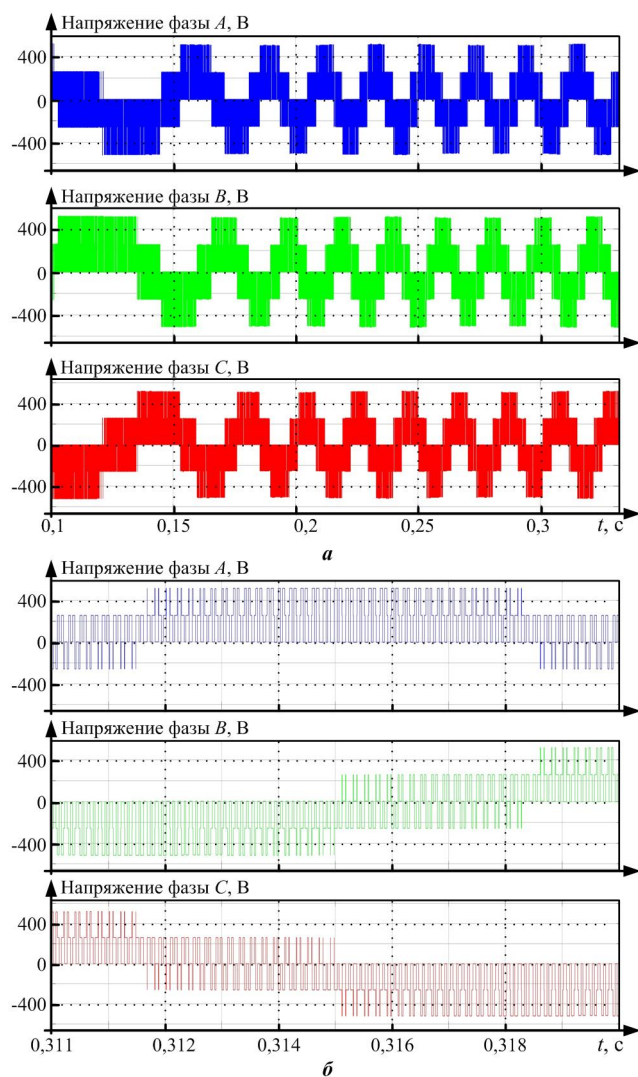


Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений при разгоне двигателя (*а*) и фазные напряжения при работе широтно-импульсной модуляции (*б*)

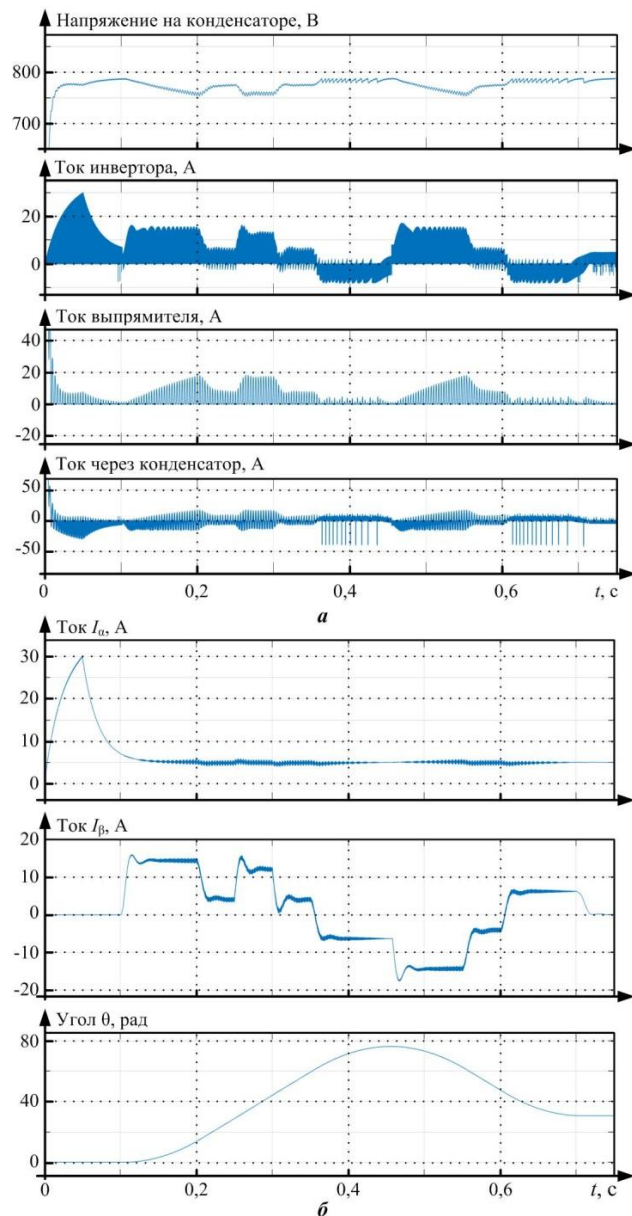


Рис. 6. Осциллограммы токов, напряжения на конденсаторе силовой схемы (*а*) и составляющие тока статора по осям α и β и угол θ (*б*)

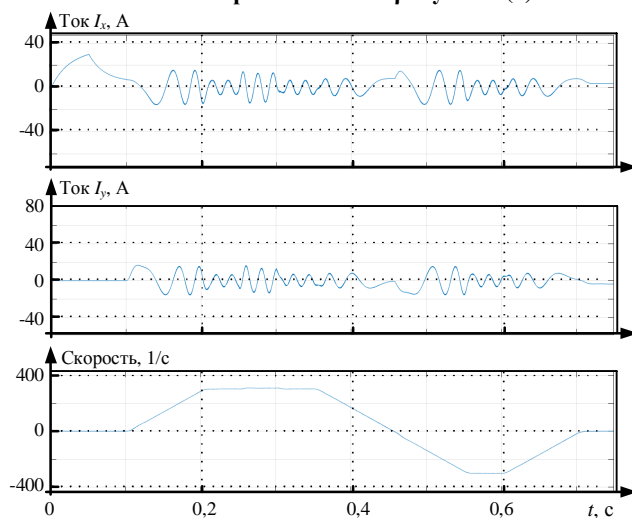


Рис. 7. Изменения составляющих тока статора в неподвижной системе координат при изменении скорости двигателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана модель автоматизированного электропривода переменного тока с частотным регулированием скорости с векторным управлением с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потока сцепления ротора с широтно-импульсной модуляцией.

2. Структура разработанной модели в максимальной степени приближена к структуре реального электропривода переменного тока с векторным регулированием скорости, так как используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink, и при описании двигателя учитываются взаимосвязи по различным каналам регулирования без известных допущений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей. Кроме того, в модели возможен учет кривой намагничивания двигателя, имеется возможность наблюдать большое количество переменных состояния двигателя.

3. Модель позволяет анализировать изменение переменных электропривода с векторным управлением с учетом системы трехфазных токов и напряжений, питающих двигатель, и осуществляет преобразование прямоугольных систем координат, в которых рассматриваются переменные двигателя.

4. Модель может быть использована для анализа режимов работы отдельных элементов электропривода в тормозных режимах с учетом тормозного резистора и заданных пределов изменения напряжения в звене постоянного тока.

5. Модель позволяет анализировать работу электропривода с учетом влияния параметров широтно-импульсной модуляции в инверторе напряжения.

6. Полученная модель может быть использована для анализа работы электропривода переменного тока при различных настройках регуляторов системы регулирования скорости.

7. Разработанная модель может быть использована в учебном процессе для иллюстрации и изучения процессов в электроприводе переменного тока в различных режимах его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.
4. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб.: СПбГУ-ИТМО, 2006. 94 с.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.

6. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 48-57.
7. Электрооборудование современных цехов ОАО «ММК» / Е.Я. Омельченко, А.Н. Козин, В.Н. Маколов, П.А. Бовшик, С.Н. Попов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №1(22). С. 43-46.
8. Головин В.В., Косенков А.В., Разворотнев В.П. Опыт внедрения современных электроприводов в ОАО «ММК» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №3-2. С. 149-156.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. NJ: Prentice Hall, 2002. 738 p.
10. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
11. Терехин В.Б., Деметьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. М.: Издательство Юрайт, 2019. 306 с.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power System и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
13. Герман-Галкин С.Г. MATLAB&SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Издательство «Корона. Век», 2014. 368 с.
14. Шохин В.В., Пермякова О.В., Короткова Е.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 70-75.
15. Шохин В.В., Храмшин В.Р., Новецки Р.Ю. Исследование на математической модели электроприводов черновых клетей сортового стана 450 СПЦ ОАО «ММК» // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 58-66.
16. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 231-238. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.038
17. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill / V.R. Khrumshin, A.A. Radionov, G.P. Kornilov, K.E. Odintsov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 11-17. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
18. Khrumshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84. No. 4. Pp. 221-227. doi: 10.3103/S1068371213040032
19. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a widestrip hot-rolling mill / P.V. Shilyaev, I.Yu. Andryushin, V.V. Golovin, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84. No. 10. Pp. 533-541. doi: 10.3103/S106837121310009X

Поступила в редакцию 28 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR VECTOR CONTROL SYSTEM WITH AN ELECTRIC COORDINATE CONVERSION

Valery V. Shokhin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, valeri4549@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

Vadim R. Khramshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, hvrmgn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

Gennady P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Industrial Power Supply, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Olga V. Permyakova

Senior Lecturer, Department of Computer Science and Information Safety Engineering, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, mrs.permyakova.olga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4949-0744>

The paper is concerned with the structural scheme model of the asynchronous motor vector control system with frequency control of the speed in which the coordinate conversion is carried out. A virtual model of an asynchronous motor from the Simulink Matlab library is used. The engine power is carried out from the frequency converter with a DC link with a pulse modulation. The speed control system is constructed using the principles of subordinate control of the electric drive coordinates. To analyze the operation of electric drives with vector control, a structural modeling method is adopted. The advantage of the presented model is making use of virtual models of asynchronous motors from the Simulink library. This significantly simplifies the modeling process and presents great opportunities for researchers. In this case, during the study of electric drives, it is only necessary to specify the main parameters of the motor under study. It is possible to take into account the magnetization curve of electrical steel. To measure the motor variables, a special unit is provided in which a large number of electrical machine variables can be displayed. The consideration of the motor along such a model leads to a structural diagram of the motor without simplifications, which are often entered when compensating cross-links through the channels of flow control channels and the moment. Blocks are created in which the three-phase stator current system is transformed into a two-phase system in a fixed coordinate system. This two-phase system is then converted into a two-phase coordinate system rotating with the speed of the stator field with the orientation of the real axis according to the rotor stream vector. The output coordinates of this block are used as feedback signals on the constituent stator current, proportional to the stream and the electromagnetic torque of the engine. A system of subordinate control of the coordinates of the electric drive coordinate for speed control is created. The output of this regulatory system is the voltage reference signals presented in a two-phase coordinate system rotating with the speed of the engine field. These signals are converted to a two-phase immobile coordinate system, and then into a three-phase system of the specifying signals for the frequency converter. The presented structure of the AC electric drive model gives significant opportunities to researchers when analyzing the operation of alternating current.

Keywords: Asynchronous motor, vector control, frequency converter, fixed and rotating coordinate system, structural modeling, subordinate coordinate control, latitudinal and pulse modulation.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya electropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing house of MPEI, 2015. 373 p. (In Russian)
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie electroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, IGEU Publ., 2008. 298 p. (In Russian)
3. Sokolovskiy G.G. *Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Frequency-controlled AC electric drives]. Moscow, Publishing center «Academy», 2007. 272 p. (In Russian)
4. Usoltsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors]. Saint Petersburg, St. Petersburg SU-ITMO Publ., 2006. 94 p. (In Russian)
5. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya electropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing center «Academy», 2006. 304 p. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Voikov V.N. Vector control system of valve electric drive based on autonomous voltage inverter with relay control of the inverter input current and stator phase current. *Vestnik YuUrGU. Seria: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power engineering], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 48-57. (In Russian)
7. Omelchenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N. Electrical equipment of modern shops at OJSC «MMK». *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 1(22), pp. 43-46. (In Russian)
8. Golovin V.V., Kosenkov A.V., Razvorotnev V.P. Implementation of modern electric drives at OJSC «MMK». *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2010, iss. 3, vol. 2, pp. 149-156. (In Russian)
9. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. NJ: Prentice Hall, 2002. 738 p.
10. Shrainer R.T. *Matematicheskoe modelirovanie electropriwodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical simulation of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p. (In Russian)
11. Terekhin V.B., Dementyev Yu.N. *Kompyuternoe modelirovanie sistem elektropriroda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink* [Computer simulation of DC and AC drive systems in Simulink]. Moscow, Publishing house Yright, 2019. 306 p. (In Russian)
12. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, Sim Power System i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, Sim Power System and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
13. German-Galkin S.G. *MATLAB&SIMULINK. Proektirovanie mekhatronnykh system na PK* [MATLAB&SIMULINK. Mechatronics system development on PC]. St. Petersburg, Publishing house «Crown. Century», 2014. 368 p. (In Russian)
14. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. Simulation of interrelated frequency controlled electric drive of a rolling mill. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, iss. 21, pp. 70-75. (In Russian)

15. Shokhin V.V., Khamshin V.R., Novetski R.Yu. Application of mathematical model to investigate roughing stand electric drives of 450 section mill at steel-making shop of OJSC MMK. *Vestnik YuUrGU. Seria: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power engineering], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 58-66. (In Russian)
16. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 231-238. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.038.
17. Khamshin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 11-17. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
18. Khamshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221-227. doi: 10.3103/S1068371213040032.
19. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khamshin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a widestrip hot-rolling mill. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533-541. doi: 10.3103/S106837121310009X

Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем с преобразованием координат электропривода / В.В. Шохин, В.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, О.В. Пермякова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 29-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-29-37)

Shokhin V.V., Khamshin V.R., Kornilov G.P., Permyakova O.V. Simulation of the Asynchronous Motor Vector Control System with an Electric Coordinate Conversion. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 29-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-29-37)