

М.А. РЫБАЛЬЧЕНКО, аспирант, В.И. ГОЛОВКО, д-р техн. наук, проф.,
А.А. ВЕРХОВСКАЯ, канд. техн. наук, доц., Г.А. ПАПАНОВ, ст. преподаватель
ГВУЗ «Национальная металлургическая академия Украины»,
ГВУЗ «Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ЗАТВОРА ВЕСОВОЙ ВОРОНКИ СИСТЕМЫ ШИХТОПОДАЧИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В статье рассмотрены характеристики векторной и скалярной систем управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Показано, что для получения высоких динамических показателей и высокой точности поддержания скорости наиболее предпочтительной является векторная система управления электроприводом. При разработке математической модели привода затвора весовой воронки использовался принцип ориентации системы координат по вектору потокосцепления ротора. В этом случае модель асинхронного двигателя приобретает сходство со структурной схемой машины постоянного тока, где возможно раздельное управление магнитным состоянием и моментом на валу двигателя. Выполнено моделирование работы электропривода затвора весовых воронок шихтоподачи доменной печи объемом 5000 м³ в среде MATLAB Simulink. Установлено, что применение системы векторного управления асинхронным двигателем затвора весовой воронки позволит реализовать формирование многокомпонентной порции шихты на доменном конвейере в любой последовательности разгрузки весовых воронок.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Особенностью технологии загрузки современных доменных печей с конвейерной подачей шихты на колошник является возможность управления смешиванием различных видов материалов по длине порции, формируемых на конвейере с целью повышения эффективности распределения в доменной печи и увеличения производительности агрегата в целом [1].

Формирование многокомпонентных порций можно осуществить с помощью ЭВМ системы шихтоподачи в процессе разгрузки материалов из весовых воронок на доменный конвейер [2,3].

Для получения требуемых параметров порций необходим регулируемый выпуск шихтовых материалов из весовых воронок с одновременным контролем геометрических параметров шихты на конвейере.

Ранее для управления выпуском магнитных материалов использовались устройства [4-6]. Положительные результаты применения электромагнитного регулятора расхода шихтового материала отмечены в работе [7]. А его использование при формировании смешанной железорудной порции описано в [8].

Однако данные устройства не позволяют регулировать расход шихты при разгрузке из весового бункера в широком диапазоне, с большой точностью и высоким быстродействием. Для решения такой задачи эффективным является применение управляемого электропривода затворов весовых воронок.

Анализ исследований и публикаций. Управление выпуском материала на современных доменных печах осуществляется в основном затвором секторного типа.

Его открытие (закрытие) осуществляется поворотом тяги, связанной с кривошипом, при его повороте на угол 180° после подачи напряжения на электродвигатель. Одновременно подается (снижается) напряжение на электромагнитный тормоз для расторможения (торможения) быстроходно вала редуктора.

В качестве приводного двигателя применяют асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором, который реализован на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат электропривода (ЭП) в широком диапазоне, с высоким быстродействием и большой точностью. В качестве силового преобразователя используется преобразователь частоты (ПЧ).

Различают векторное и скалярное управление ЭП.

Характеристики векторной системы и скалярной управления ЭП сведены в табл. 1.

Показатель	СВУЭП		Скалярная СУЭП	
	без датчика скорости	инкрементальный энкодер	без датчика скорости	инкрементальный энкодер
Точность регулирования	0,2%	0,02%	20%	10%
Диапазон регулирования	1:100	1:1000	(6-10):1	$\approx 2/S_k$
Метод регулирования	$\psi^2 = \text{const}$		$U/f = \text{const}$	$U/f = \text{const}$
Перегрузочная способность	Постоянная во всем диапазоне частот вращения ротора		Низкая в области малых частот вращения ротора	

В таблице обозначено: СВУЭП – система векторного управления электроприводом; S_k - критическое скольжение двигателя; ψ_2 - потокосцепление ротора; U – напряжение на статоре; f – частота напряжения на статоре

Как следует из таблицы, для получения высоких динамических показателей, высокой точности поддержания скорости наиболее предпочтительной является векторная система управления электроприводом. В источниках [9-14] описаны принципы построения системы векторного управления по ориентации потокосцепления ротора. В [12,14] есть примеры синтеза регуляторов, которые можно применить при построении системы управления по структурной схеме [9,11].

Наиболее полно принципы системы векторного управления изложены в [12,14]. В указанных источниках есть сведения о современном построении систем векторного управления, проблемы возникающие при построении таких систем, способы реализации моделей потока и скорости.

Постановка задачи. Целью работы явилась разработка системы управления асинхронным двигателем затвора весовой воронки шихтоподачи доменной печи с конвейерной подачей шихты на колошник для регулирования выпуска материалов на конвейер в процессе формирования многокомпонентных порций.

Изложение материала и исследований. Идея векторной системы управления асинхронным двигателем заключается в реализации раздельного управления скоростью и потокосцеплением. Ток двигателя измеряется в неподвижной системе координат x - y и преобразуется во вращающуюся систему координат α - β (рис. 1).

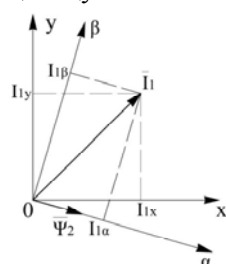


Рис. 1. Система координат α - β в системе координат x - y

При ориентации оси α по вектору потокосцепления ротора одна проекция вектора тока определяет величину потокосцепления, а вторая проекция пропорциональна скорости вращения вала двигателя.

В теории систем управления асинхронными электроприводами нашел место уникальный принцип ориентации системы координат по вектору потокосцепления ротора. В данном случае имитационная модель АД приобретает определенное сходство со структурной схемой машины постоянного тока, где возможно раздельное управление магнитным состоянием и моментом на валу двигателя.

Математически условие ориентации выражается следующим образом

$$\psi_{ry} = 0; \frac{d\psi_{ry}}{dt} = 0; \psi_{rx} = \psi_r \quad (1)$$

где ψ_{ry} и ψ_{rx} - проекции потокосцепления ротора.

Уравнения, описывающие АД в системе координат с принудительной ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

$$\begin{cases} \frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sx} - r_e i_{sx} + k_r a_r \psi_r + l_e \omega_k i_{sy}) \\ \frac{di_{sy}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sy} - r_e i_{sy} - k_r \omega_r \psi_r - l_e \omega_k i_{sx}) \\ \frac{d\psi_r}{dt} = r_r k_r i_{sx} - a_r \psi_r; \quad 0 = r_r k_r i_{sy} - \beta_k \psi_r \\ m = k_m \psi_r i_{sy}; \quad \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{нагр}) \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{sx}, i_{sy}, u_{sx}, u_{sy}$ – составляющие векторов тока и напряжения статора; r_r, a_r, k_r, k_m – коэффициенты, учитывающие параметры АД; r_e - эквивалентное активное сопротивление двигателя

ля; l_e - эквивалентная индуктивность рассеивания двигателя; J, ω_r, m – момент инерции, частота вращения и момент, развиваемый на валу АД; $m_{нагр}$ – момент приложенный к валу двигателя со стороны нагрузки.

В системе β_k представляет собой скольжение системы координат, а ω_k соответственно скорость ее вращения. Данные параметры определяются в соответствии со следующими выражениями

$$\beta_k = \frac{r_r k_r i_{sy}}{\psi_r}; \omega_k = \omega_r + \beta_k . \quad (3)$$

В системе уравнений переменные с индексами «x» и «y» соответствуют компонентам пространственного вектора в координатной системе с ориентацией по вектору потокосцеплений ротора ψ_r . С помощью правил создания и преобразования структурных схем, принятых в теории автоматического управления, представим систему уравнений в виде структурной схемы. На рис. 2 представлена структурная схема, имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора ψ_r .

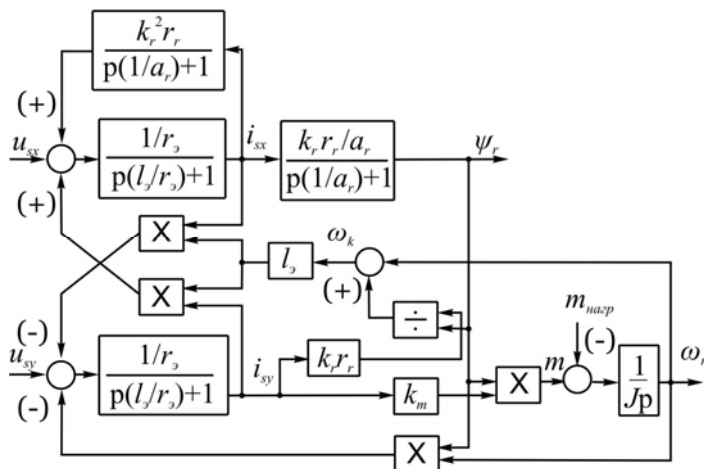


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора ψ_r

ра, частотой вращения, положением вала двигателя использовался метод определения желаемой передаточной функции с настройкой на модульный оптимум.

При расчете контура управления частотой вращения (в данном случае объект управления содержит интегральное звено) возникла необходимость использования пропорционального регулятора при настройке на модульный оптимум, что делает невозможным получение системы астатической по возмущению. Именно поэтому выполнен расчет двукратно - интегрирующей системы регулирования скорости, а для приближения характеристик контура к характеристикам, соответствующим настройке на модульный оптимум на входе контура установим фильтр в виде аperiодического звена.

Общая схема управления АД представлена на рис. 3.

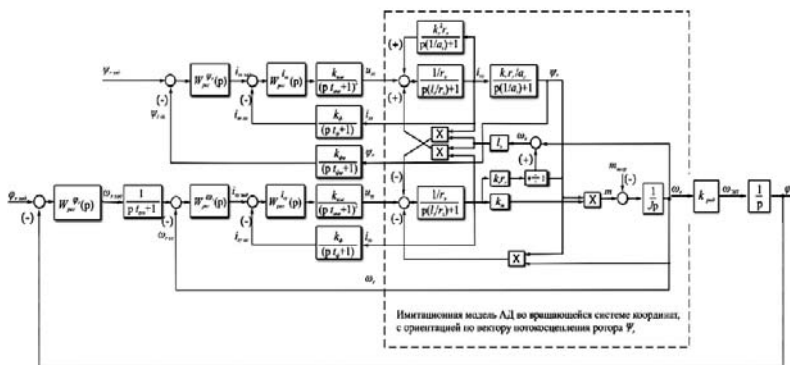


Рис. 3. Общая схема управления АД с векторным управлением с принудительной ориентацией по потокосцеплению ротора

Модель АД, изложенная выше, удобна для реализации и расчета в любом из прикладных программных продуктов, поддерживающих объектно-структурное моделирование систем (Simulink-Matlab, Windora и т.д.).

Моделирование работы электропривода весовых воронок шихтоподачи доменной печи (ДП) объемом 5000 м³ ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», проведено в среде MATLAB Simulink, обладающей широкими возможностями выполнения математического моделирования, создавая модель из простых

блоков. Также в среде Simulink содержатся блоки, которые позволяют визуализировать процессы моделирования.

На шихтоподаче указанной ДП работают асинхронные двигателя с короткозамкнутым ротором типа АР.

Технические характеристики двигателя АР 83-12: синхронная частота 500 об/мин; номинальная частота вращения 460 об/мин; число пар полюсов 6; мощность 6,7 кВт; пусковой момент 392 Н·м; максимальный момент 395 Н·м; пусковой ток 70А; номинальный ток 17А; $\cos\varphi=0.72$; КПД 83% ; $J_{дв}=1.925\text{кг/м}^2$.

Общая схема моделирования в среде Matlab Simulink представлена на рис.4.

На рис. 5 представлены результаты моделирования.

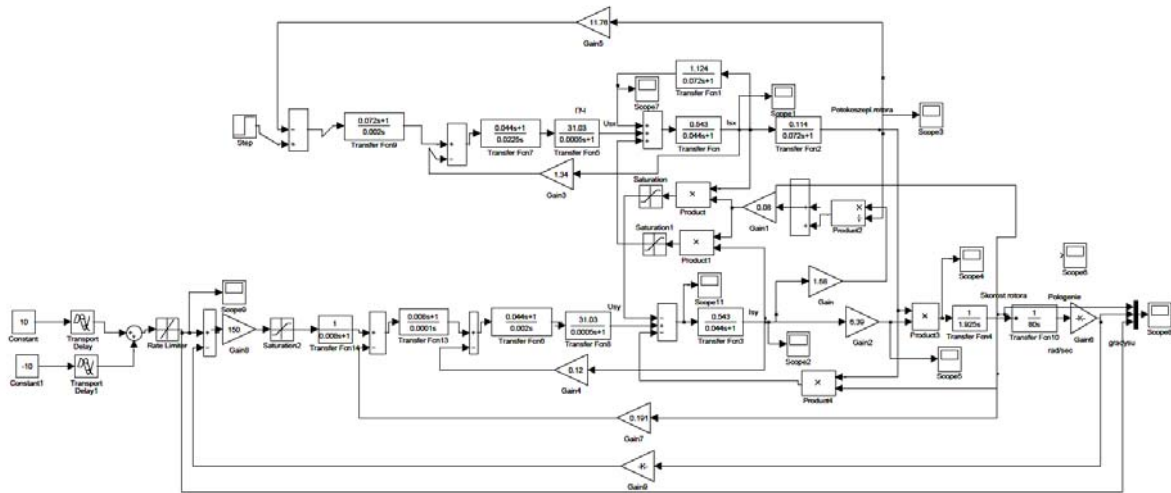


Рис. 4.Общая схема моделирования системы векторного управления АД с ориентацией по потокоцеплению ротора в среде Matlab/Simulink

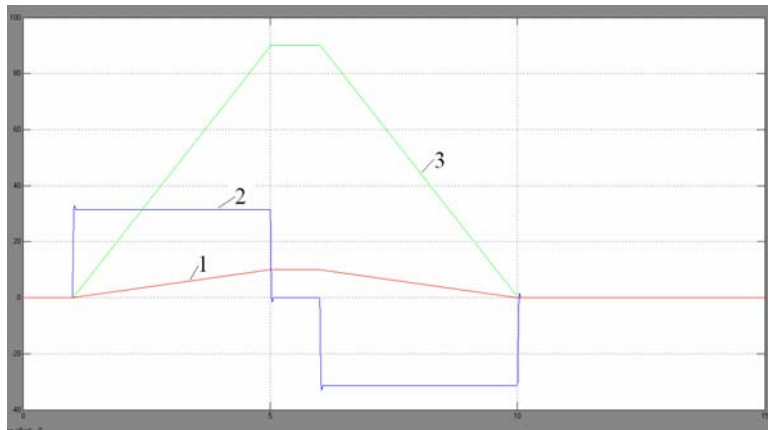


Рис. 5. Результаты моделирования: 1-задание; 2-скорость двигателя; 3-угол перемещения

Результаты работы обеспечивают анализ процессов в электродвигателе при векторном управлении в момент пуска от задатчика интенсивности, работе в установившемся режиме и торможении.

Анализ графиков показывает, что разгон двигателя до установившейся скорости и его торможение составляет 0.1с, перерегулирование 3,8%, статическая ошибка равна 0.

График изменения положения затвора плавно подходит к заданному значению, что обеспечивает отсутствие перерегулирования, а, следовательно, выполняется технологическое требование о точной остановке технологического механизма.

Таким образом, для электропривода весовых воронок доменной печи с конвейерной подачей шихты на колошник наилучшим является векторное управление с ориентацией по потокоцеплению ротора.

Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат электропривода в широком диапазоне, с высоким быстродействием и большой точностью.

Применение такой системы управления позволит реализовать формирование многокомпонентной порции шихты на доменном конвейере в любой последовательности разгрузки весовых воронок.

Список литературы

1. **Большаков В.И.** Теория и практика загрузки доменных печей / **В.И. Большаков.** – М.: Металлургия, 1990. – 255 с.
2. **Праздников А. В.** Системы шихтоподачи в доменном производстве: монография [для инж.-техн. И науч. Работников] / **А. В. Праздников, Е. Я. Клоцман, В. И. Головки.** – М.: Металлургия, 1980. – 200 с.
3. **Клоцман Е.Я.** Системы шихтоподачи доменных печей / **Е.Я. Клоцман.** – Днепропетровск: Пороги, 2007. – 204 с
4. **Гиршман Ю.И., Головки В.И., Дмитриев Э.М. и др.** «Затвор бункера» Авторское свидетельство СССР № 918188. МПК В65Д 90/58. Заявка № 2861017. Приоритет изобретения 02.01.1980. Опубликовано 07.04.1982. Бюллетень №13.
5. **О.Н.Кукушкин, Е.Я.Клоцман, В.И.Головки, Н.Г.Иванча, Э.М.Дмитриев** «Устройство для выпуска ферромагнитных сыпучих материалов из бункера». Авторское свидетельство СССР № 971885. МПК С21В7/20. Заявка № 2979044. Приоритет изобретения 08.07.1980. Опубликовано 07.11.1982. Бюллетень №41
6. **О.Н.Кукушкин, Е.Я.Клоцман, В.И.Головки, Н.Г.Иванча, Н.С.Антипов** «Способ подачи магнитных материалов на доменный конвейер». Авторское свидетельство СССР № 1027217. МПК С21В7/20. Заявка № 3360846. Приоритет изобретения 27.11.1981. Опубликовано 07.07.1983. Бюллетень №25
7. Освоение системы загрузки современной доменной печи/**В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо, Н.Г. Иванча** и др.(Обзор.информ.). – М.:Ин-т Черметинформация, 1989. – 53 с.
8. **О.Н.Кукушкин, Е.Я.Клоцман, Н.Г.Иванча и др.** «Способ подачи железорудных материалов на доменный конвейер». Авторское свидетельство СССР № 1539207. МПК С21В7/20. Заявка № 4240722.. Опубликовано 30.01.1990. Бюллетень №4.
9. **Терехов В.М.** Системы управления электроприводов: учебник для студ.вузов/ **В.М. Терехов, О.И. Осипов;** под ред. В.М. Терехова. - 3-е изд., стер. - М.:Издательский центр "Академия", 2008. - 304 с.
10. **Чиликин М. Г.** и др. Теория автоматизированного электропривода: Учеб.пособие для вузов /**Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С.** —М.: Энергия, 1979. — 616 с
11. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат., 1982. - 392с.
12. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина". - 2008. - 298с.
13. **Рудаков В. В.** и др. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / **В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Даргау.** - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 136 с.
14. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учебн. зав. **Г.Г. Соколовский.** - М.: Академия, 2006. – 272 с.
15. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. **А.Э. Кравчик, М.М.Шлаф** – М.: Энергоиздат, 1982 – 504 с.

Рукопись поступила в редакцию 20.03.15

УДК 681.513.6: 622.7: 622.34

В.В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., К. В. МАЄВСЬКИЙ, магістрант,
Криворізький національний університет

ФОРМУВАННЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА

Наведено результати дослідження методів формування автоматизованого керування технологічним процесом подрібнення в умовах нестабільності характеристик залізорудної сировини та невизначеності параметрів технологічного процесу.

Проаналізовано моделі та методи керування процесом подрібнення руди, представленої технологічними різновидами для забезпечення заданої продуктивності технологічних агрегатів.

Розглянуто роботу класичних та адаптивних регуляторів у системі керування завантаженням млина першої стадії подрібнення.

Побудовано модель кульового млина у середовищі імітаційного комп'ютерного моделювання MATLAB/Simulink. Досліджено роботу моделі у системі керування з використанням класичного ПІД-регулятора. Для підвищення якості керування подрібненням досліджено роботу адаптивних регуляторів, що засновані на модернізованих методах Зіглера-Нікольса.

Представлено результати застосування у системі керування адаптивних регуляторів, заснованих на фільтрації диференційного компонента з використанням апроксимації Тастина, методу прямокутної та трапецієвидної дискретизації. У результаті проведених досліджень встановлено, що найкращим регулятором для процесів керування подрібненням технологічних різновидів залізорудної сировини з урахуванням нестационарності характеристик ре-