

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1085)

5.2022



ВЕЧНАЯ СЛАВА
ПАВШИМ ГЕРОЯМ

С праздником
Победы!

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 5 (1085), май 2022 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Редактор: Э. Э. Бабали

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617

почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 5 (1085), май 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 09.06.2022. Формат 60x90/8.

Печ. л. 10,5. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)

9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

30 лет Новотроицкому филиалу НИТУ «МИСиС»

<i>Д. Р. Ганин, А. А. Панычев, А. Ю. Фукс.</i> Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья	4
<i>Г. А. Куницын, М. С. Кузнецов, А. Н. Шаповалов, И. В. Бакин.</i> Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям	9
<i>А. А. Токарев, А. В. Каляскин, А. В. Бархатов, Е. В. Братковский.</i> Совершенствование технологии позднего графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна	16
<i>А. В. Нефедов, А. А. Китанов, Н. А. Чиченев.</i> Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь»	22
<i>Д. А. Болдырев, С. П. Нефедьев, М. В. Харченко, Р. Р. Дема.</i> Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка»	27
<i>А. В. Цуканов, К. В. Лицин, С. Н. Басков.</i> Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства	34

Подготовка сырьевых материалов

<i>А. Б. Лебедев, П. В. Мусинова.</i> Формирование прочности окомкованного многофазного спека двухкальциевого силиката	40
--	----

Прокатка

<i>В. А. Пименов.</i> Анализ влияния технологических режимов и состояния оборудования на возникновение вибраций при непрерывной холодной прокатке	47
<i>Д. Ю. Алексеев, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева, А. С. Кузнецова.</i> Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки	55

Нанесение покрытий и защита от коррозии

<i>Д. Д. Фазуллин, Г. В. Маврин, Л. И. Фазуллина, И. Г. Шайхиев, Н. М. Лядов.</i> Ингибиторы коррозии стали на основе растительного сырья для защиты нефтепромыслового оборудования	61
---	----

Сварка и наплавка

<i>М. А. Шекшеев, С. В. Михайлицын, А. Б. Сычков, А. Н. Емелюшин.</i> Исследование влияния шлаковой системы покрытых электродов на эффективность инокулирования металла сварочной ванны низкоуглеродистой стали.	68
--	----

Машиностроительные технологии

<i>А. Н. Малышев, С. А. Бысов, В. Д. Кухарь, Ю. В. Бессмертная.</i> Экспериментальное исследование вытяжки стальных квадратных коробок по схеме круг-квадрат в радиальной и конической матрицах	74
---	----

Технологические измерения

<i>А. Д. Гусев, И. В. Тихонова, Я. А. Стаханова.</i> Применение нейронных сетей для прогнозирования измерения микротвердости в зоне термического влияния листов углеродистых и низколегированных сталей после лазерной резки.	79
---	----

Юбилей

Леониду Николаевичу Шевелеву — 85 лет	84
---	----

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства

А. В. Цуканов, студент¹, эл. почта: 03-06-2000@mail.ru

К. В. Лицин, доцент², канд. техн. наук, эл. почта: k.litsin@rambler.ru

С. Н. Басков, доцент², канд. техн. наук, эл. почта: baskovsn@susu.ru

¹Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.

Рассмотрена актуальная в настоящее время проблема использования оборудования с асинхронным двигателем на металлургических предприятиях. На производстве используется достаточно большое количество оборудования, где установка датчика скорости на вал двигателя невозможна по условиям эксплуатации, технологическим, экономическим и другим ограничениям. Поэтому актуальным направлением развития электропривода является использование систем с наблюдателем скорости или угла положения ротора.

Выполнен сравнительный анализ различных бездатчиковых систем в асинхронном электроприводе. Представлена целесообразность использования наблюдателей в асинхронных двигателях вместо датчиков скорости. Сформулированы общие требования к бездатчиковому электроприводе. Определены основные преимущества и недостатки каждого из методов. Выявлена необходимость разработки новой модели, отвечающей всем предъявляемым требованиям.

Полученная модель способна косвенно определить параметры установки с использованием только ее статорных переменных, а также может работать на малых скоростях, близких к нулю. Это обеспечивает данной модели преимущества перед имеющимися методами. Приведен вывод зависимости на основе базовой модели электропривода. На основе полученных уравнений разработана математическая модель асинхронного бездатчикового электропривода в программе Matlab.

Выполнен сравнительный анализ результатов определения величины реальной и оцениваемой скоростей. Полученный результат удовлетворяет выдвинутому ранее требованиям. Разработанная система может быть использована в цехах металлургического производства, в частности листопрокатном цехе в условиях работы прокатного стана.

Ключевые слова: металлургия, листопрокатный цех, электропривод, асинхронные двигатели, бездатчиковые системы, наблюдатель, фильтр Калмана, активный фильтр Баттерворта, адаптивный наблюдатель.

DOI: 10.17580/chm.2022.05.06

Введение

Механизмы металлургических предприятий, задействованные в сложном технологическом цикле, часто работают в условиях повышенных вибраций и присутствия загрязняющих компонентов в окружающей среде [1, 2]. Данные факторы в совокупности негативно влияют на измеряющие приборы, снижая точность их показаний.

Переход к бездатчиковым системам управления позволяет уменьшить габариты устройства, избавиться от погрешности измерения, возникающей из-за присутствия соединительных компонентов между датчиками и устройствами обработки информации [3]. Как следствие, повышается скорость работы системы. Все эти показатели напрямую влияют на объемы выпускаемой продукции [4–6]. Таким образом, наиболее актуальным местом для внедрения бездатчиковых электроприводов является сталеплавильное производство, в частности объекты электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, Оренбургская обл.), требующие уменьшения

массогабаритных показателей при сохранении текущего уровня точности проводимых измерений или в которых установка механического датчика определения скорости невозможна по условиям эксплуатации. Подобными объектами являются электроприводы подъема и перемещения мостовых кранов, электроприводы перемещения стелевозов и шлаковозов.

Целью данной работы является разработка системы бездатчикового электропривода на базе асинхронного двигателя для применения его в электроприводах объектов сталеплавильного производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Исследование систем асинхронного электропривода без использования механического датчика.
2. Разработка адаптивной модели определения скорости асинхронного электродвигателя косвенным методом.
3. Исследование разработанной адаптивной модели асинхронного электродвигателя.

Сравнительный анализ методов бездатчикового определения углового положения ротора

Большинство ведущих фирм-производителей силовых преобразователей выпускает технику, предназначенную для работы в режимах как с датчиком, так и без него. Например, наибольшей популярностью пользуются преобразователи частоты (ПЧ) компаний ABB (ACS380, ACS355), Schneider Electric (ATV340, ATV71, ATV32), Siemens (серии Simovert Masterdrives Vector Control, Sinamics S120, G120).

Основное преимущество применения данных ПЧ заключается в надежной и бесперебойной работе: при поломке датчика система сразу переходит в режим бездатчикового управления.

Режим без датчика с моделью двигателя обеспечивает более высокую динамическую регулировочную характеристику и большую устойчивость против опрокидывания, чем обычный привод с управлением U/f . Однако по сравнению с приводами с датчиком точность скорости ниже и следует рассчитывать на потерю динамики и в точности вращения [7].

Специальная настройка позволяет реализовать предупредительное управление моментом разгона, что улучшит динамику управления. Предупреждение осуществляется оптимально по времени с использованием движущего момента, с учетом существующих ограничений момента и тока, а также момента инерции нагрузки необходимым моментом для требуемой динамики скорости [2, 8].

Данные агрегаты имеют высокую стоимость, поэтому в настоящее время актуальной является разработка наблюдателей состояний, применение которых возможно реализовать с использованием уже установленной преобразовательной техники на производстве, что позволит сократить расходы [9].

В работе [10] предложен метод, основанный на использовании угловых зависимостей действующих значений напряжения на обмотках двигателя. С использованием переменных определяется, в каком из шести секторов находится ротор, чтобы определить, какие статорные обмотки необходимо подключить для создания максимального двигательного момента. Достоинствами данного метода являются:

- определение начального углового положения с точностью до сектора;
- простая структура вычислителя;
- необходимость программируемого контроллера с малыми вычислительными ресурсами;
- шесть датчиков напряжения.

Главным недостатком предлагаемого метода является невозможность использования мгновенных значений, так как возникает проблема деления на ноль.

В работах [11, 12] описана реализация наблюдателя состояний. Наблюдатель представляет собой систему дифференциальных уравнений, решаемых в режиме реального времени. Высокая зависимость точности наблюдателя от текущих значений параметров модели и точности измеренных величин негативно влияет на использование наблюдателя в асинхронных двигателях.

В работе [13] к недостаткам можно отнести сложную структуру и запаздывание в формировании электромагнитного

момента двигателя, который происходит вследствие обработки больших объемов данных. Кроме того, для реализации больших вычислений требуется дорогостоящее оборудование в виде мощного процессора и большого объема памяти.

В работе [14] представлено математическое имитационное моделирование системы. Простые методы синтеза и структура являются достоинствами данной бездатчиковой системы. Для повышения точности следует использовать параметрическую идентификацию двигателя, что также позволит отслеживать изменения параметров и в случае необходимости внести корректировку [15, 16]. Существенным недостатком данного метода является высокая чувствительность к изменениям параметров, что делает его не столь популярным для использования.

В работах [17–20] предложен способ вычисления момента нагрузки асинхронного двигателя на основе наблюдателя Люенбергера. Главным недостатком являются расхождения между динамическими характеристиками объекта и наблюдателя при моделировании в программной среде Matlab на графиках переходного процесса угловой скорости вращения ротора. Для предотвращения погрешностей в статье предложено применение пассивного фильтра. Однако это приводит к существенному усложнению операций вычисления, что отражено в работах [21–23].

Разработка адаптивной модели асинхронного электродвигателя

Сравнительный анализ показал, что, несмотря на очевидные преимущества, бездатчиковые системы имеют определенные недостатки, из которых следует выделить два основных:

- повышенную чувствительность электропривода к изменению его внутренних параметров;
- высокую погрешность результата большинства бездатчиковых систем при работе на низких или нулевых скоростях.

Разработана модель, позволяющая определить необходимые параметры на основе набора известных величин и минимально необходимого количества измеряемых.

На основе известных уравнений, описывающих работу асинхронного электродвигателя [3, 6, 24] может быть получена его математическая модель, описываемая системой уравнений (1):

$$u_{s\alpha} = \sqrt{2}U_{sA} \sin(2\pi ft),$$

$$u_{s\beta} = -\sqrt{2}U_{sA} \cos(2\pi ft),$$

$$i_{s\alpha} = -\sqrt{2}I_{sA} \cos(2\pi ft),$$

$$i_{s\beta} = -\sqrt{2}I_{sA} \sin(2\pi ft),$$

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = e_{s\alpha} = u_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_s,$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = e_{s\beta} = u_{s\beta} - i_{s\beta}R_s,$$

$$\frac{d\Psi_{\mu\alpha}}{dt} = e_{\mu\alpha} = u_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_s - L_{\sigma s} \frac{di_{s\alpha}}{dt},$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{\mu\beta}}{dt} &= e_{\mu\beta} = u_{s\beta} - i_{s\beta}R_s - L_{\sigma s} \frac{di_{s\beta}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_{ra}}{dt} &= e_{ra} = \frac{u_{sa} - i_{sa}R_s - (L_{\sigma s} + k_r L_{\sigma r}) \frac{di_{sa}}{dt}}{k_r}, \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= e_{r\beta} = \frac{u_{s\beta} - i_{s\beta}R_s - (L_{\sigma s} + k_r L_{\sigma r}) \frac{di_{s\beta}}{dt}}{k_r}, \\ \Delta u_{ra} &= e_{ra} - \frac{L_{\mu} i_{sa}}{(L_{\sigma r}/R_r)}, \\ \Delta u_{r\beta} &= e_{r\beta} - \frac{L_{\mu} i_{s\beta}}{(L_{\sigma r}/R_r)}, \\ \omega &= \frac{\Psi_{ra} \Delta u_{r\beta} - \Psi_{r\beta} \Delta u_{ra}}{p_0(\Psi_{ra}^2 + \Psi_{r\beta}^2)}, \\ M &= 3 \cdot \frac{3}{2} (\Psi_{sa} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{sa}), \\ M_{дин} &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \\ M_C &= M - M_{дин} \end{aligned} \quad (1)$$

где I_s, U_s — действующее значение тока и напряжения фазы статора машины соответственно; R_s — активное сопротивление статора; R_r — активное сопротивление ротора; $\bar{\Psi}_s$ — вектор потокосцепления статора; $\bar{\Psi}_r$ — вектор потокосцепления ротора; \bar{e}_s — изображающий вектор ЭДС статора; \bar{e}_r — вектор ЭДС ротора; ω — угловая скорость вращения ротора машины, где e_{μ} — вектор ЭДС условного контура намагничивания; $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}, L_{\mu}$ — собственные индуктивности рассеяния статора, ротора и эквивалентная взаимная индуктивность обмоток статора и ротора соответственно; $\Psi_{sa}, \Psi_{s\beta}$ — проекции вектора потокосцепления статора на оси α и β соответственно; $\Psi_{\mu\alpha}, \Psi_{\mu\beta}$ — проекции изображающего вектора потокосцепления в воздушном зазоре машины; k_r — коэффициент связи (коэффициент приведения) ротора; p_0 — число пар полюсов машины, $\frac{L_{\sigma r}}{R_r} = T_r$ — электромагнитная постоянная времени ротора машины.

Процесс преобразования координат abc/αβ осуществляется при помощи известного преобразования Кларк [15] с блоком автоподстройки частоты [12].

С целью построения математической модели в программном комплексе Matlab Simulink применили преобразования Лапласа. Таким образом, система уравнений (1) приняла вид:

$$\begin{aligned} U_{sa}(p) &= \frac{2\sqrt{2}\pi f}{(2\pi f)^2 + p^2} U_{sA}, \\ U_{s\beta}(p) &= \frac{-2\sqrt{2}p}{(2\pi f)^2 + p^2} U_{sA}, \\ I_{sa}(p) &= \frac{-2\sqrt{2}p}{(2\pi f)^2 + p^2} I_{sA}, \\ I_{s\beta}(p) &= \frac{-2\sqrt{2}\pi f}{(2\pi f)^2 + p^2} I_{sA}, \\ E_{sa}(p) &= U_{sa}(p) - I_{sa}(p)R_r, \\ E_{s\beta}(p) &= U_{s\beta}(p) - I_{s\beta}(p)R_r, \\ \Psi_{sa}(p) &= \frac{E_{sa}(p)}{p}, \\ \Psi_{s\beta}(p) &= \frac{E_{s\beta}(p)}{p}, \\ M(p) &= 3 \cdot \frac{3}{2} (\Psi_{sa}(p)I_{s\beta}(p) - \Psi_{s\beta}(p)I_{sa}(p)), \\ \omega &= \frac{M(p) - M_c}{Jp}, \end{aligned} \quad (2)$$

На основе системы уравнений (2) при помощи блоков программы Matlab Simulink может быть получена адаптивная модель асинхронного двигателя (рис. 1).

С целью проведения исследований разработанной адаптивной модели проведем ее сравнительный анализ с системой прямого пуска асинхронного электродвигателя (рис. 2).

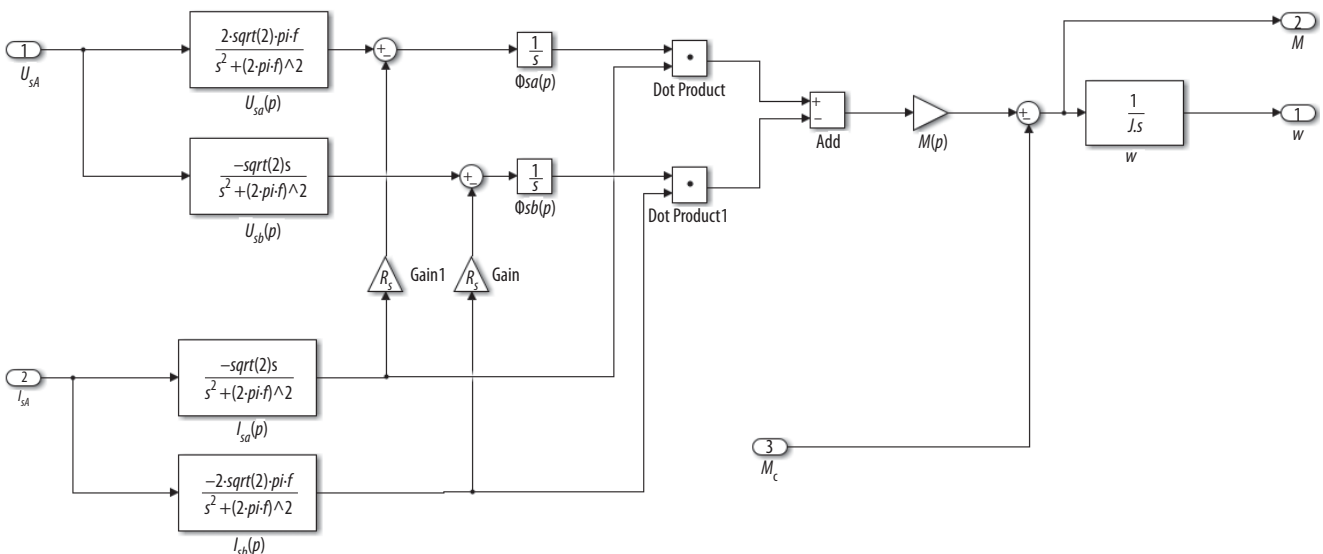


Рис. 1. Адаптивная модель асинхронного двигателя

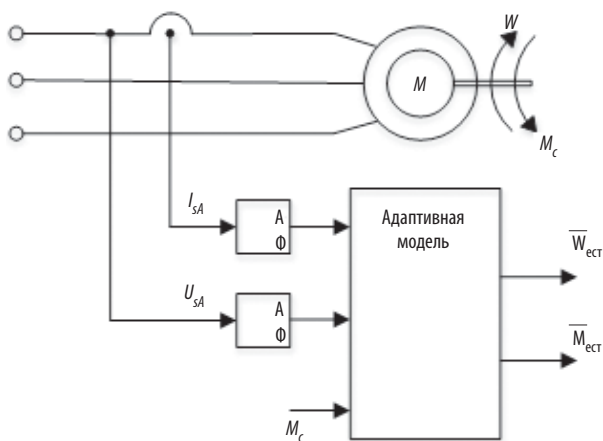


Рис. 2. Имитационная модель: M_c — момент сопротивления, $\overline{W}_{\text{ест}}$ — оцениваемая скорость; $\overline{M}_{\text{ест}}$ — оцениваемый момент

В качестве двигателя выбран стандартный двигатель из программы Matlab Simulink с параметрами 4 кВт, 1430 об/мин. Согласно его паспортным данным, проведен расчет значений адаптивной модели.

Измерение реальной скорости двигателя проводили при помощи модели датчика скорости, значение оцениваемой скорости $\overline{W}_{\text{ест}}$ получено на основе датчика тока, измеряющего значение I_{sA} и датчика напряжения U_{sA} , на выходе разработанной адаптивной модели асинхронного двигателя. Значения скоростей приняты в относительных единицах. Результаты моделирования представлены на **рис. 3**.

По графику на рис. 3 видно, что оцениваемая скорость имеет более плавное перерегулирование по сравнению с реальной. Величина максимальной погрешности достигает 11,58 % в момент выхода на установившуюся скорость. Погрешность за время разгона электродвигателя (на низких скоростях) составляет около 5,7 %.

Экспериментальные исследования были проведены на базе лаборатории электропривода и мехатроники Южно-Уральского государственного университета.

В качестве экспериментального стенда выбран асинхронный двигатель АИР 100S2 (4 кВт, 1430 об/мин), по своим характеристикам идентичный ранее представленному моделируемому электродвигателю в Matlab Simulink. Следует отметить, что при проведении экспериментальных исследований был использован трехфазный сетевой фильтр DL-10EAX1. Учитывая отсутствие нелинейных элементов для регулирования скорости электродвигателя данного фильтра достаточно для снижения негативного влияния высших гармоник в напряжениях и токах статорной обмотки.

При проведении экспериментальных исследований было необходимо учитывать изменения значений сопротивлений статорной обмотки в процессе нагрева двигателя, величину скорости по причине наличия данных параметров в системе уравнений (2). Согласно работе [25], идентификацию параметров трехфазного асинхронного двигателя целесообразно проводить с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции, что было реализовано на основе функциональной схемы устройства идентификации параметров. Реализация модели идентификации

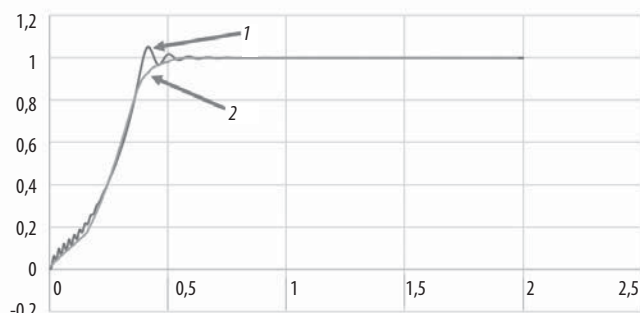


Рис. 3. Сравнительный анализ результатов определения величины скорости на модели двигателя и наблюдателя: 1 — реальная; 2 — оцениваемая

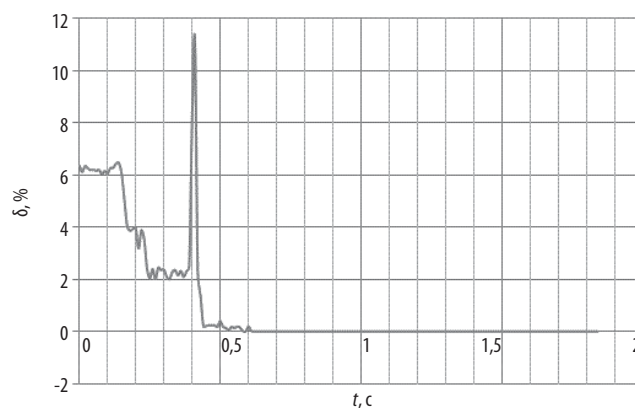


Рис. 4. График погрешности

параметров и бездатчикового определения угловой скорости асинхронного двигателя выполнена в Matlab Simulink, которая получает необходимые данные с двигателя через устройство Voombox control platform [26].

График относительной погрешности при сравнении оцениваемой и реальной скоростей в результате проведения экспериментальных исследований представлен на **рис. 4**.

Наибольшая разница погрешности составляет 11,2 %, что определяется введением ограничения на нарастание скорости в период достижения максимального результата. В диапазоне нулевых скоростей максимальная погрешность составляет порядка 6 %, в основном диапазоне скорости идентичны друг другу.

Обсуждение результатов

В результате проведенных экспериментов получены переходные характеристики реальной (на основе известной модели электродвигателя программы Matlab Simulink) и оцениваемой скоростей электродвигателя. Наибольшее расхождение в процессе моделирования в программе Matlab Simulink составило 11,58 % в момент достижения максимального значения, что обусловлено внутренними ограничениями адаптивной модели, способствующей более плавному нарастанию скорости. В результате проведенных экспериментов на базе разработанного лабораторного стенда максимальное расхождение составило 11,2 %. Отмечено, что для проведения практических экспериментов был использован трехфазный сетевой фильтр, позволяющий уменьшить

влияние помех со стороны сети, а также модель идентификации параметров асинхронного двигателя для определения динамично меняющихся сопротивления статора двигателя и момента инерции. Внедрение дополнительной схемы параметризации несколько усложняет математическое описание модели, но не оказало влияние на ее инерционность, так как все механизмы реализованы программно.

Погрешность 11,2 % допустима для объектов сталеплавильного цеха, не требующих высокой точности определения положения объекта, но не имеющих возможности установки механического датчика. Таким образом, работоспособность разработанной адаптивной модели электропривода на базе асинхронного электродвигателя для установок сталеплавильного производства подтверждена на имитационной модели в программе Matlab Simulink и в результате проведенных лабораторных исследований. Внедрение разработанной бездатчиковой системы в электроприводы на базе асинхронного двигателя позволит уменьшить их массогабаритные показатели, увеличить надежность и сроки эксплуатации. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанного метода составит от 90 до 480 тыс. руб. в диапазоне мощностей системы электропривода от 30 до 400 кВт.

Заключение

Проведен анализ известных методов бездатчикового определения скорости вращения ротора, определены недостатки и преимущества каждого. Предложенная модель адекватно отражает процессы электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе, обладает достаточной точностью в определении основных механических параметров машины в статике и динамике и может быть применена на практике в информационно-управляющих системах автоматизированного электропривода. Достоинством данной модели является также простота дифференциальных уравнений, позволяющая легко перейти к разностным уравнениям и реализации алгоритма модели на цифровой вычислительной технике. ЧМ

Библиографический список

1. Лицин К. В., Цуканов А. В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 382–388.
2. Doan P. T., Bui T. L., Kim H. K., Kim S. B. Sliding-mode observer design for sensorless vector control of AC induction motor // 9th Asian Control Conference (ASCC). 2013. P. 1–5.
3. Ключев В. И. Теория электропривода : Учеб. для вузов. — 2-е изд. перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1998. — 704 с.
4. Setareh M., Parniani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2020. Vol. 2. P. 301–304.
5. Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61, Iss. 5. P. 315–360.
6. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. № 3. С. 46–51.
7. Gong L., Zhu Z. Q. Saliency investigation of PM brushless AC motors for high-frequency carrier signal injection-based sensorless control // The 17th International Conference on Automation and Computing. 2011. P. 86–91.

8. Xu D., Wang B., Zhang G., Wang G., Yu Y. A review of sensorless control methods for AC motor drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2018. Vol. 2, Iss. 1. P. 104–115.
9. Yin Z., Gao F., Zhang Y., Du C., Li G., Sun X. A review of nonlinear Kalman filter applying to sensorless control for AC motor drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2019. Vol. 3, Iss. 4. P. 351–362.
10. Усынин Ю. С., Козина Т. А., Валов А. В., Лохов С. П. Определение начального углового положения ротора в бездатчиковой системе импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 17. С. 111–115.
11. Исаков А. С., Ушаков А. В. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 4(38). С. 280–286.
12. Цуканов А. В., Лицин К. В. Обзор способов определения скорости двигателей переменного тока // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. — Магнитогорск, 2021. Т. 1. С. 254.
13. Глазырин А. С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4: Энергетика. С. 107–111.
14. Однолько Д. С. Математическое имитационное моделирование системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем в условиях параметрических возмущений // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 2. С. 31–35.
15. Басков С. Н., Лицин К. В., Радионов А. А. Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме векторно-импульсного пуска // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 3–8.
16. Mao H., Xiao J. Real-Time Conflict Resolution of Task-Constrained Manipulator Motion in Unforeseen Dynamic Environments // IEEE Transactions on Robotics. 2019. Vol. 35, Iss. 5. P. 1276–1283.
17. Лысенко О. А. Наблюдатель момента нагрузки асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой ротора // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 5(149). С. 85–89.
18. Куксин А. В., Романов А. В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода // Вестник ВГТУ. Серия «Вычислительные и информационно-телекоммуникационные системы». 2009. Т. 5. № 2. С. 38–44.
19. Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 272. P. 40–46.
20. Лицин К. В., Гусев А. А., Ковальчук Т. В. Исследование электропривода системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 38–43.
21. Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 274. P. 116315.
22. Fidele M. M. Extraction of tellurium from lead and copper bearing feed materials and interim metallurgical products // Minerals Engineering. 2018. Vol. 115. P. 79–87.
23. Baskov S. N., Litsin K. V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding // Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146993.
24. Zhou L., Tokekar P. Sensor Assignment Algorithms to Improve Observability while Tracking Targets // IEEE Transactions on Robotics. 2019. Vol. 35, Iss. 5. P. 1206–1219.
25. Афанасьев А. Ю., Макаров В. Г., Яковлев Ю. А., Ханнанова В. Н. Устройство идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 107–119.
26. BoomBox user manual [Электронный доступ]. URL: <https://imperix.com/wp-content/uploads/2018/06/User-Manual-BoomBox.pdf> (дата обращения: 01.12.2021).

"Chernye metally", 2022, No. 5, pp. 34–39
DOI: 10.17580/chm.2022.05.06

Development of a control system for an asynchronous electric motor based on an adaptive model in the conditions of sheet rolling production

Information about authors

A. V. Tsukanov, Student¹, e-mail: 03-06-2000@mail.ru;

K. V. Litsin, Cand. Eng., Associate Professor², e-mail: k.litsin@rambler.ru;

S. N. Baskov, Cand. Eng., Associate Professor², e-mail: baskovsn@susu.ru

¹ Novotroitsk Branch of NUST MISIS, Orsk, Russia.

² South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Abstract: The current problem of using equipment with asynchronous motors at metallurgical enterprises is considered. A fairly large number of equipment is used in production, where the installation of a speed sensor on the motor shaft is impossible due to operating conditions, technological, economic and other restrictions. Therefore, the actual direction of development of the electric drive is the use of systems with an observer of the speed or angle of the rotor position.

A comparative analysis of various sensorless systems in an asynchronous electric drive is carried out. The expediency of using observers in asynchronous motors instead of speed sensors is presented. The general requirements for the sensorless electric drive are formulated. The main advantages and disadvantages of each method are determined. The need to develop a new model that meets all the requirements has been identified.

The resulting model is able to indirectly determine the parameters of the machine using only its stator variables, and also capable of operating at low speeds close to zero. Thus, this model has advantages over existing methods. The derivation of the dependence based on the basic model of the electric drive is given. On the basis of the obtained equations, a mathematical model of an asynchronous sensorless electric drive was developed in the Matlab program.

A comparative analysis of the results of determining the value of the real and estimated speeds is carried out. The developed system can be used in metallurgical workshops, in particular, in steelmaking facilities that do not require a high level of determination of the angular position. As a result of laboratory experiments, it was required to use an additional system to identify the parameters of an induction motor based on a continuous gradient method for finding the minimum of a function.

Key words: metallurgy, steelmaking, electric drive, asynchronous motors, sensorless systems, observer, Kalman filter, active Butterworth filter, adaptive observer.

References

- Litsin K. V., Tsukanov A. V. Development of an automated electric drive for the control system of a two-coordinate welding machine. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2021. Vol. 64. No. 5. pp. 382–388.
- Doan P. T., Bui T. L., Kim H. K., Kim S. B. Sliding-mode observer design for sensorless vector control of AC induction motor. *9th Asian Control Conference (ASCC)*. 2013. pp. 1–5.
- Klyuchev V. I. Theory of the electric drive: tutorial for universities. 2nd edition revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 704 p.
- Setareh M., Parmiani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 2. pp. 301–304.
- Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61, Iss. 5. pp. 315–360.
- Vinogradov A., Sibirtsev A., Kolodin I. Adaptive-vector control system of a sensorless asynchronous electric drive of the EPV series. *Silovaya elektronika*. 2006. No. 3. pp. 46–51.
- Gong L., Zhu Z. Q. Saliency investigation of PM brushless AC motors for high-frequency carrier signal injection-based sensorless control. *The 17th International Conference on Automation and Computing*. 2011. pp. 86–91.
- Xu D., Wang B., Zhang G., Wang G., Yu Y. A review of sensorless control methods for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2018. Vol. 2, Iss. 1. pp. 104–115.
- Yin Z., Gao F., Zhang Y., Du C., Li G., Sun X. A review of nonlinear Kalman filter applying to sensorless control for AC motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2019. Vol. 3, Iss. 4. pp. 351–362.
- Usynin Yu. S., Kozina T. A., Valov A. V., Lokhov S. P. Determination of the initial angular position of the rotor in a sensorless system of pulse-vector control of an asynchronous motor with a phase rotor. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2012. No. 17. pp. 111–115.
- Isakov A. S., Ushakov A. V. Implementation of an observer of states of an induction motor with a squirrel-cage rotor in a sensorless vector control system. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2007. No. 4 (38). pp. 280–286.
- Tsukanov A. V., Litsin K. V. Review of methods to determine the speed of AC motors. *Actual problems of modern science, technology and education. Abstracts of the 79th International Scientific and Technical Conference*. Magnitogorsk, 2021 Vol. 1. p. 254.
- Glazyrin A. S. Sensorless control of an asynchronous electric drive with a synergic controller. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Energetika*. 2012. Vol. 321. No. 4. pp. 107–111.
- Odnolko D. S. Mathematical simulation modeling of a sensorless vector control system for an asynchronous motor under conditions of parametric disturbances. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika*. 2015. No. 2. pp. 31–35.
- Baskov S. N., Litsin K. V., Radionov A. A. Determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor in the vector-pulse start mode. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemlya*. 2014. No. 4. pp. 3–8.
- Mao H., Xiao J. Real-Time Conflict Resolution of Task-Constrained Manipulator Motion in Unforeseen Dynamic Environments. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019. Vol. 35, Iss. 5. pp. 1276–1283.
- Lysenko O. A. Load torque observer of double squirrel cage induction motor. *Omskiy nauchny vestnik. Seriya: Pribory, mashiny i tekhnologii*. 2016. No. 5 (149). pp. 85–89.
- Kuksin A. V., Romanov A. V. Mathematical model of the adaptive-vector control system of a sensorless asynchronous electric drive. *Vestnik VGTU. Seriya: Vychislitelnye i informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy*. 2009. Vol. 5. No. 2. pp. 38–44.
- Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 272. pp. 40–46.
- Litsin K. V., Gusev A. A., Kovalchuk T. V. Study of the electric drive of the system for feeding a slag-forming mixture to the mold of a continuous casting machine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2018. Vol. 61. No. 5. pp. 38–43.
- Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 274. p. 116315.
- Fidele M. M. Extraction of tellurium from lead and copper bearing feed materials and interim metallurgical products. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 115. pp. 79–87.
- Baskov S. N., Litsin K. V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding. *Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2015.
- Zhou L., Tokekar P. Sensor Assignment Algorithms to Improve Observability while Tracking Targets. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019. Vol. 35, Iss. 5. pp. 1206–1219.
- Afanasyev A. Yu., Makarov V. G., Yakovlev Yu. A., Khannanova V. N. Three-phase asynchronous motor parameter identification device. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2015. No. 5–6. pp. 107–119.
- BoomBox user manual [Electronic access]. Available at: <https://imperix.com/wp-content/uploads/2018/06/User-Manual-BoomBox.pdf> (access: 01.12.2021).

НОВОСТИ:
ГОРНОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ДОМА «РУДА И МЕТАЛЛЫ»

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА TELEGRAM-КАНАЛ
t.me/OreMet

РЕКЛАМА

12+