

УДК 62-83:622(075)

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОМ-КАЧАЛКОЙ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С БЕЗДАТЧИКОВЫМ МЕТОДОМ

Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tobac15@mail.ru

Резюме: Станки-качалки нефти (СКН) являются основными элементами в российской нефтедобывающей отрасли в сфере малодобитных скважин. И повышение энергоэффективности данных станков является одной из перспективных задач в интересах нефтегазовой отрасли России.

Применение интеллектуальных энергосберегающих станций управления станком-качалкой нефти на базе синхронных двигателей позволяет оптимизировать добычу нефти, за счет увеличения объема продукции и экономии энергоресурсов. Главным недостатком данных станций является высокая стоимость, что является сдерживающим фактором для широкого применения.

Одним из вариантов решения данной проблемы является применение метода, не использующего датчик положения ротора, так называемый «бездатчиковый метод». Однако большинство работ, связанные с использованием «бездатчикового метода» относятся к системам управления асинхронными двигателями.

В данной работе представлены преимущества систем управления станком-качалкой на базе синхронных двигателей перед асинхронными, рассмотрены варианты управления двигателем и исполнения «бездатчикового метода». Представлены математические модели всех элементов станции управления: станок-качалка, синхронный двигатель, система векторного управления.

Ключевые слова: синхронный двигатель, система управления, бездатчиковый метод, векторное управление, насосная установка.

Благодарности: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», Соглашение №074-11-2018-020 с Минобрнауки РФ от 30 мая 2018 г.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-107-116

MODEL OF THE CONTROL SYSTEM ROCKING MACHINES OF OIL THE BASIC OF A SYNCHRONOUS ENGINES WITH THE SENSORLESS METHOD

T.I. Petrov, A.R. Safin, I.V. Ivshin, A.N. Tsvetkov, V.Yu.Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tobac15@mail.ru

Abstract: Rocking machines of oil (RMO) are the main elements in the Russian oil industry in the field of low-yield wells. And increasing the energy efficiency of these machines is one of the most promising tasks in the interests of the oil and gas industry in Russia.

The use of intelligent energy-saving stations for controlling the machine-shaker of oil on the basis of synchronous engines makes it possible to optimize oil production, by increasing the volume of production and saving energy resources. The main disadvantage of these stations is high cost, which is a deterrent for widespread use.

One of the solutions to this problem is the use of a method that does not use the rotor position sensor, the so-called "sensorless method". However, all works related to the use of the "sensorless method" refer to the control systems of asynchronous motors.

In this paper, the advantages of the control systems of a rocking machine on the basis of synchronous motors in front of asynchronous motors will be presented, the variants of motor control and the execution of the "sensorless method" are considered. Mathematical models of all elements of the control station are presented: rocking machine, synchronous motor, vector control system.

Keywords: *synchronous motor, control system, sensorless method, vector control, pumping unit.*

Acknowledgments: *The publication of the article was carried out within the framework of the project "Creation of a series of electric drives on the basis of Russian high-performance synchronous engines for oil pumping machines using wireless data transmission systems and an adaptive control system for smart deposits", Agreement No. 074-11-2018-020 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of May 30, 2018.*

Введение

Внедрение интеллектуальных энергоресурсосберегающих станций управления станками-качалками нефти – это ключ для решения существующей проблемы – оптимизации нефтедобычи.

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года: «Стратегической целью государственной энергетической политики является создание устойчивой национальной инновационной системы в сфере энергетики для обеспечения российского топливно-энергетического комплекса высокоэффективными отечественными технологиями и оборудованием, научно-техническими и инновационными решениями в объемах, необходимых для поддержания энергетической безопасности страны» [1].

Разработка и использование нового типа энергоресурсосберегающих технологий в сфере электроэнергетики России может достигаться только за счет нескольких условий:

- должны учитываться достижения международной науки;
- технологии должны удовлетворять современным трендам и соответствовать прогнозам в данной сфере.

Большую долю в себестоимости нефти составляют затраты на электроэнергию и обслуживание энергетического комплекса. Они достигают до 35–40% от себестоимости нефти.

Ключевыми задачами в нефтегазодобывающей отрасли является повышение эффективности использования технологического энергооборудования и разработка мероприятий и технических средств для повышения энергоэффективности использования добывающего оборудования.

На данный момент международный рынок предлагает большой выбор в сфере управления электроприводом для станков-качалок. В России также представлены разнообразные варианты решений в сфере интеллектуальных систем управления. Отличаются они алгоритмами управления, вариантами обработки данных, интерфейсами и прочим. Важно отметить, что для асинхронных двигателей оптимизация не достигает заданных значений экономии из-за отсутствия широких возможностей для регулирования, что не позволяет полностью реализовать плюсы систем интеллектуальных систем

управления. Также для станков-качалок характерен неравномерный режим нагрузки, что понижает полезную мощность асинхронных двигателей.

Синхронные электроприводы с постоянными магнитами на роторе обеспечивают более экономичное потребление энергоресурсов, в том числе за счёт организации обратной связи с электроприводами других станков. Двигатель данного типа – система, входящая в регулируемый электропривод и используемая не только для преобразования энергии, но и для изменения параметров станка-качалки.

Важным фактором, влияющим на решение о реализации проекта, является практический запрет на государственные закупки импортного нефтегазодобывающего оборудования. Важно отметить снижение затрат российских компаний на обслуживание нефтедобывающего оборудования. Реализация проекта позволит создать алгоритм управления автоматизированной станции-качалки.

На российской территории имеется большое количество запасов тяжелых и вязких нефтересурсов, добыча которых в будущем станет основой экономики. Запасы оцениваются в 7 миллиардов тонн, что позволяет России находиться в тройке лидеров по данному показателю (остальные – Канада, Венесуэлла). Большинство из этих ресурсов сосредоточены на территории Сибири, Сахалина, которые отличаются уже созданными системами и сетями для нефтедобычи. Работа с добычей вязкой и тяжелой нефти более перспективна и легче технически реализуема, чем освоение арктических шельфов (где необходимо учитывать тяжелые погодные условия и реализовать комплекс оборудования для подледной нефтегазодобычи).

«Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года» указывает на необходимость, в среднесрочной перспективе, оптимизации себестоимости добычи тяжелой и вязкой нефти в районах с развитой инфраструктурой без иностранных технологий. Следовательно, разработка и производство отечественной электроники для снижения затрат добычи с помощью «станков-качалок» может быть приоритетом.

Основными научно-техническими и технологическими задачами, решаемыми в ходе реализации данного проекта, являются задачи, связанные с разработкой отечественных конкурентоспособных станций управления станками-качалками нефти на базе высокоэффективных комплектных электроприводов с вентильными двигателями, обеспечивающих замещение зарубежных аналогов и не уступающих им по основным характеристикам.

Около 2/3 всех добывающих скважин в мире используют штанговые насосы, и на многих из них в качестве привода установлены станки-качалки.

Конечным потребителем комплектов электрооборудования для приводов штангового скважинного насоса (КЭ ПШСН) являются российские нефтедобывающие компании.

Согласно «Прогнозу научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года» разработка и производство отечественной электроники для снижения затрат добычи с помощью «станков-качалок» может быть приоритетом.

Конечный потребитель – российские нефтедобывающие компании. Основной конечный потребитель – компании ОАО «Лукойл», ПАО «Газпром», ОАО «Газпром-нефть», ОАО «Зарубежнефть», ПАО АН «Башнефть», ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Татнефть», ОАО «Новатэк», ООО «Руснефть», ООО «ИНК», «Сургутнефтегаз», «ТНК-ВР», «Славнефть».

Теоретические основы

Мы должны вкратце остановиться на принципе синхронных машин.

Главное свойство синхронных машин – поле вращающейся части неподвижно относительно самого ротора и совершает вращательное движение вместе с ним.

Собственная область возбуждения используется в магнито- и электрических машинах, а поле, пронизывающее ротор, – в синхронно-реактивных.

При разработке электроприводов классификация синхронных машин связана не только с физическими, конструктивными особенностями самой машины, сколько с характеристиками использования, алгоритмами управления и построения станций управления.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) – электрическая машина с переменным током. Статор СДПМ конструктивно аналогичен статичной части асинхронных двигателей, содержащей трехфазный тип обмотки [2].

На движущейся части имеются магниты, в зависимости от положения существуют всего 2 типа синхронных машин: двигатели с магнитами, расположенными на самом роторе, называемые поверхностным двигателем с постоянными магнитами, и двигатели с магнитами, расположенными непосредственно в стальной конструкции ротора. СДПМ обычно разрабатываются на небольшую мощность, которая не превышает и сотни кВт, и чаще всего используется в сервоприводах в сочетании с частотными преобразователями (ЧРП).

Методы управления

Направление разработки принципов управления синхронными машинами определяется совершенствованием аппаратной составляющей электропривода: характеристиками электродвигателя, видом ЧРП, присутствием разнообразных датчиков, параметрами контроллеров.

Основополагающими факторами для реализации станции управления электроприводом являются использование (неиспользование) датчиков магнитного состояния, скорости и угла поворота ротора. По этой причине методы классифицируются на вид с использованием датчика положения ротора и вид без использования ДПР, которое называется «бездатчиковым управлением» [3].

В стандартном приводе на базе синхронных двигателей на валу двигателя помещается датчик положения. Виды ДПР: датчик Холла, энкодер, резольвер, редуктосин и т.д. Система управления в этом случае довольно несложная, но конструктивно машина становится менее простой, что снижает надежность системы.

Значительные успехи в сфере актуальных систем интеллектуального управления, особенно совершенствование наблюдателей положения, привели к созданию электроприводов, не использующих ДПР. В таких системах датчик положения отсутствует, и необходимая информация для реализации алгоритма управления поступает от наблюдателя состояния. Особую роль играют такие системы в тех электроприводных системах, где установка датчика попросту невозможна. Преимущества систем, не использующих ДПР, – надежность, дешевизна, компактность.

Большинство методов контроля систем, не использующих ДПР, описанные как в отечественной, так и в зарубежной литературе, основаны на математических моделях электромагнитных процессов, происходящих в двигателях на переменном токе [4]. В таких методах расчет оценки скорости объединяется с вычислением модуля и направлением электродвижущей силы движущейся части двигателя. Данные типы методов могут отличаться получением более точных значений скорости вращения и параметром чувствительности к преобразованиям параметров, входящих в математическую модель наблюдателя. Отрицательной стороной данных методов будет неосуществимость работы привода на низких частотах, поскольку значение ЭДС ротора в приведенном примере стремится к нулю, и возможность получить необходимый сигнал будет отсутствовать [5].

На данный момент существует большое количество различных алгоритмов для оценки вариационных параметров состояния СДПМ. Их можно разделить на активные и пассивные алгоритмы. Сущность активных алгоритмов заключается во введении (впрыске) специальных высокочастотных тестовых действий в основной спектр напряжения или тока и анализе реакции двигателя на них. В данном случае, в синхронной машине и ЧРП

имеются добавочные потери, которые снижают ресурсоэффективность привода и повышают требующуюся мощность элементов. Пассивные алгоритмы оценки классифицируют на неадаптивные и адаптивные. Неадаптивные системы используют статорную или роторную модель электромагнитных процессов. Адаптивные системы, в свою очередь, используют ссылочную и настраиваемую модель, которая расширяет их функциональность. Для построения адаптивных алгоритмов используется метод функции Ляпунова.

Рассмотрим следующие методы управления СДПМ (рис. 1).

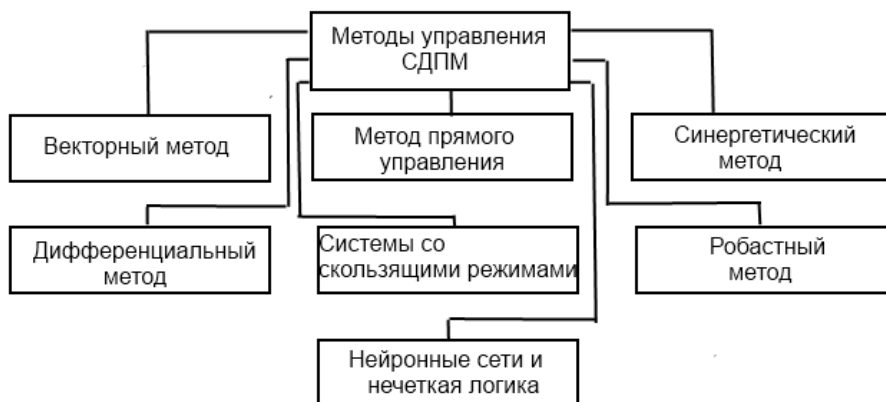


Рис. 1. Классификация методов управления СДПМ

Принцип векторного управления синхронными машинами основан на ориентации вектора потоковой связи, созданного постоянными магнитами, поэтому в некоторых источниках он называется «ориентированным на поле» [6]. Целью этого метода является управление машиной как отдельно возбужденной, где регулирование потока и крутящий момент можно контролировать отдельно в динамических и статических режимах работы двигателя. Мгновенные значения токов статора преобразуются во вращающуюся систему координат (d, q) , соединенную с ротором, с использованием математических уравнений и информации о положении ротора. Если текущий идентификатор поддерживается равным нулю, потоковая связь вдоль оси d будет постоянной. В этом случае электромагнитный момент будет пропорционален току i_q , который задается системой управления [7]. Кроме того, в целях достижения отдельного контроля потокосцепления и крутящего момента, необходимо исключить сцепление между этими двумя осями, вычитая соответствующие соединительные элементы из опорного напряжения осей, то есть компенсировать перекрестные связи.

Метод прямого управления крутящим моментом первоначально использовался для асинхронных машин, но в данный момент используется и для других двигателей. Сутью принципа этого способа управления является подбор вектора напряжения из определенных величин (справочные таблицы) [8]. Синхронно контролируются как момент, так и поле статора. Данный метод имеет несколько плюсов: надежность добивается за счет изменяющихся характеристик, система становится проще (нет контура для управления током) и обеспечивается высокая скорость. Но главный недостаток метода – возникающие колебания и пульсации для малых значений нагрузки.

Следующим будет рассмотрен синергетический метод управления. Критерии управления будут выражены через инварианты. Для синхронных машин будут выбраны 2 инварианта: электромагнитный момент и частота вращения. Недостатками метода

являются, как и в случае нейронных сетей, трудность обработки данных, достоинство – значительная точность.

Следующим способом управления рассматривается система с изменяющимися (скользящими) режимами, которые имеют переменные структуры. Суть принципа – знак управляющего сигнала изменяется на противоположный, когда поверхность скольжения пересекается, что описывается уравнением, составленным на основе вариационных характеристик [9]. Минусы скользящего управления – наличие вероятности потери стабильности при достижении поверхности скольжения, скорое изнашивание частей привода из-за переключений.

Способ дифференциального управления уменьшает пульсацию момента. Данный метод основывается на исследовании знаков производных моментов статорной связи. Главный минус данного способа управления – это отрицательные изменения параметров при максимальном значении напряжения [10].

Известны разработки и в области методов выбросоустойчивых (робастных) методов. Принцип заключается в анализе зависимостей механических характеристик от изменения параметров машины, что позволяет получить качественный режим работы. Необходимость сокращения необходимой совокупности параметров о машине и снижения стоимости корректировки – условия для более широкого исследования данного метода. Однако выбросоустойчивый метод так и не нашел широкого применения в сфере систем управления.

Сети нейронных вычислений и нечеткая логика – перспективные инструменты для реализации методов управления. При использовании этих методов неважно, линейная система или нет, так как данные сети производительны при высоких значениях шума. Недостатком использования сети нейронных вычислений и нечетких контроллеров является необходимость в большой мощности для обработки, а также сложность алгоритмов.

Наиболее распространенными системами управления синхронными двигателями являются метод прямого управления крутящим моментом и векторный. Метод прямого управления работает лучше для контроля и устранения помех, и векторный метод проигрывает по скорости реагирования к изменяющимся характеристикам и требует использования более энергозатратной широтно-импульсной модуляции. Но стоит отметить, что система векторного управления имеет и свои достоинства в режимах статики: более низкие расходы мощности и меньший коэффициент пульсации. Следовательно, данный метод предпочтительнее в приводах со стабильной нагрузкой и управлением. Поскольку в этой статье анализируется привод для станков-качалок, в качестве метода управления синхронной машиной будет сделан выбор в сторону векторной системы, так как достигаются более энергоэффективные режимы работы из-за низких уровней гармоник, в отличие от метода прямого управления.

Модель системы управления

Модель синхронного двигателя представим в виде уравнений равновесия электродвижущей силы на основе 2 закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned}u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt},\end{aligned}$$

где потокосцепления равны:

$$\begin{aligned}\psi_A &= L_A i_A + \Phi_0 \cos \omega t, \\ \psi_b &= L_b i_b + \Phi_0 \cos(\omega t - 120), \\ \psi_c &= L_c i_c + \Phi_0 \cos(\omega t + 120).\end{aligned}$$

Чтобы перевести в мгновенные значения пространственных векторов, необходимо перемножить на $2/3$, $2/3a$, $2/3a^2$, соответственно, и сложить уравнения:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt},$$

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_s \vec{i}_s + \vec{\Phi}_0 \vec{\Psi}_s.$$

Электромагнитный момент и уравнения равновесия моментов будут равны:

$$M = \frac{3}{2} p^* \text{mod}(\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s) = \frac{3}{2} p^* \text{mod}(\vec{\Phi}_0 \times \vec{i}_s),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H.$$

Однако модель синхронной машины обычно рассматривают во вращающейся системе координат (d, q) , при этом совмещая ось d по оси ротора. В этом случае система примет вид:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega,$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega,$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f,$$

$$\psi_q = L_q i_q,$$

$$M = \frac{3}{2} p(\psi_d i_q \times \psi_q i_d),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H - \beta \omega_m.$$

Станок-качалка и штанговая скважинная насосная установка

При работе с неконтролируемым приводом станка-качалки (СК) характеристики изменения расположения точки подвеса колонны штанги (ТПКШ) можно определить через геометрические размеры элементов станка, однако считаем, что скорость вращения качалки не будет изменяться в промежуток времени, равный периоду качательного движения качалки. С этой точки зрения кинематическая система СК была исследована большим количеством авторов и достаточно подробно. В этих исследованиях предполагалось, что задается закон изменения расположения кривошипа качалки (при условии, что скорость вращения является константой), и на основании этого были определены характеристики перемещения остальных элементов станка. Основываясь на этом, были определены динамические силы в звеньях насосной установки и, соответственно, электроэнергетические параметры привода СК.

Однако при практическом использовании неконтролируемого привода СК частота вращательного движения двигателя установки не является постоянной, так как во время продолжительности, равной времени качания качалки, крутящий момент на валу электродвигателя изменяется в значительных пределах. В свою очередь, из-за того факта, что скорость не является постоянной во время работы качалки, характеристики расположения точки подвеса колонны штанги изменяются, что приводит к появлению дополнительных динамических сил в станке и звеньях насосной установки. Поэтому для более точного описания всех процессов, которые происходят в звеньях станка и насосной установки, необходимо решить задачу относительно характеристик точки подвеса при непостоянстве частоты вращения двигателя ШНСУ.

При использовании ЧРП, совместимого с приводом качалки, есть возможность произвести оптимизацию характеристик точки подвеса. Достигается данная оптимизация за

счет изменения частоты вращения двигателя качалки, вследствие чего происходит уменьшение максимальных значений динамических сил в звеньях всей машины. В то же время необходимо определиться с законом перемещения точки подвеса, как совокупности законов преобразования частоты вращения двигателя и характеристик перемещения кривошипа качалки.

Таким образом, в процессе дальнейшего развития кинематической модели СК, необходимо решить следующие задачи:

1) определить параметры перемещения точки подвеса с определенными правилами кривошипного перемещения СК при непостоянстве мгновенного значения частоты вращения двигателя насосной установки (назовем прямое движение);

2) определить характеристики кривошипного движения станка-качалки при данных законах перемещения точки подвеса (назовем возвратное движение).

Расчет характеристик кривошипного движения СК для определенных законов перемещения точки подвеса (данный расчет необходим для определения значений возвратного движения)

Предположим, что задан закон перемещения точки подвеса, в этом случае необходимо определить параметры кривошипного движения СК – угол поворота, угловую скорость и угловое ускорение (определить уравнения движения кривошипа станка-качалки), то есть:

$$\phi_{кр} = f(S_A),$$

$$\omega_{кр} = f(S_A, v_A),$$

$$\varepsilon_{кр} = f(S_A, v_A, \alpha_A).$$

При нахождении характеристик кривошипного движения станка мы предполагаем в дальнейшем, что положительное направление характеристик перемещения ТПКШ является направленным вниз (в направлении ускорения силы тяжести). Кроме того, в качестве нулевого угла вращательного движения кривошипа качалки (начало координат) берем угол поворота кривошипа, при котором точка подвеса располагается в нижней мертвой точке. В этом случае рассматривается момент, когда кривошип станка-качалки вращается по часовой стрелке (устье скважины находится слева от наблюдающего).

Система, моделирующая станцию управления ШСНУ на базе высокоэффективных синхронных двигателей с постоянными магнитами

Модель рассматриваемой станции управления включает в себя следующие взаимосвязанные элементы (рис. 2):

- модель синхронного двигателя с постоянными магнитами, которая описывает механическо-электрические процессы в приводе машины;
- блок, моделирующий систему, основанную на векторном управлении и описывающую изменения в ЧРП;
- модели кинематических задач;
- преобразователь значений из стандартного алгоритма во вращающийся;
- модель, характеризующая «колонна – насосная установка – уровень жидкости»;
- динамическая модель СК, которая описывает динамические процессы в звеньях установки при условии непостоянства значения частоты вращения вала двигателя ШСНУ;
- контроллер, необходимый при реализации бездатчикового метода управления.

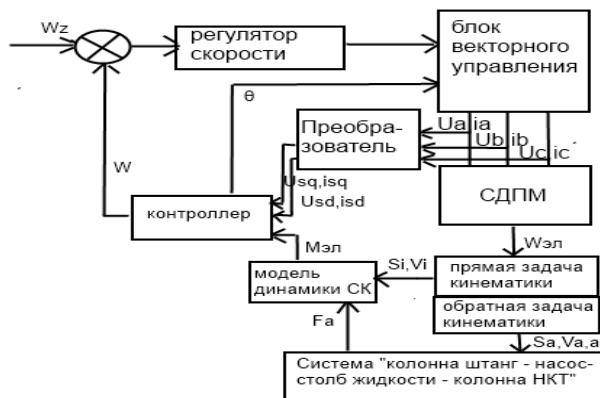


Рис. 2. Модель системы станция управления ШСНУ на базе высокоэффективных синхронных двигателей с постоянными магнитами

Выводы

В статье продемонстрирована актуальность данной тематики, на основании сравнения систем электроприводов с синхронными и асинхронными двигателями, с экономической и практической точки зрения. Рассмотрены потенциальные сферы применения данных установок и приводятся составляющие модели системы управления, включающие в себя модель синхронного двигателя и станка-качалки. Построена модель системы управления ШНСУ на базе высокоэффективных синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года.
2. Вейнгер А.М. Регулируемые электроприводы переменного тока. М., 2009. 102 с.
3. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2013. 63 с.
4. Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2005. 120 с.
5. Vas. P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford: Oxford University Press, 1998. P. 376.
6. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). ЭФО: 2013. 63 с.
7. Trzynadlowski A.M., Kirlin R.L., Legowski S.F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. P. 44.
8. Абд Эль Вхаб А.Р., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 4. С. 93–99.
9. Ruykin Sergey. Sliding mode for synchronouselectric drive. Eduardo Palomar Lever–CRC Press. 2011. P. 208.
10. Завьялов В.М, Абд Эль Вхаб А.Р. Дифференциальное управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. // Современный электропривод. 2012. № 1. С. 8.

Авторы публикации

Петров Тимур Игоревич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сафин Альфред Робертович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета

(КГЭУ).

Ившин Игорь Владимирович – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Корнилов Владимир Юрьевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Energy Strategy of Russia for the period up to 2030.
2. Weinger A.M. Adjustable electric drives of alternating current. М., 2009. P. 102. (in Russian)
3. Kalachev Yu.N. Observers of the state in a vector electric drive. Moscow, 2013. P. 63. (in Russian)
4. Pankratov VV, Zima E.A. Energy-optimal vector control of asynchronous electric drives. Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2005. P. 120. (in Russian)
5. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford: Oxford University Press, 1998. P. 376.
6. Kalachev Yu.N. Vector regulation (practice notes). EF: 2013. P. 63. (in Russian)
7. Trzynadlowski A.M., Kirlin R.L., Legowski S.F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. P. 44.
8. Abd El Vkhav AR, Karakulov AS, Dementiev Yu.N., Kladiev SN Comparative analysis of vector control and direct torque control of a synchronous electric motor with permanent magnets. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2011. № 4. Pp. 93–99. (in Russian)
9. Ryvkin Sergey. Sliding mode for synchronous electric drive. Eduardo Palomar Lever–CRC Press. 2011. P. 208.
10. Zavyalov VM, Abd El Vkhav AR Differential control of the torque of a synchronous motor with permanent magnets // Modern electric drive. 2012. № 1. P. 8. (in Russian)

Authors of the publication

Timur I. Petrov – postgraduate at the Department of «Power supply of industrial enterprises» Kazan State Power Engineering University.

Alfred R. Safin – cand. sci. (techn.), assistant professor at the Department of «Power supply of industrial enterprises» Kazan State Power Engineering University.

Igor V. Ivshin – doctor of Technical Sciences, associate professor at the Department of «Power supply of industrial enterprises» Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Tsvetkov – cand. sci. (techn.), assistant professor at the Department of «Power supply of industrial enterprises» Kazan State Power Engineering University.

Vladimir Yu. Kornilov – doctor of Technical Sciences, associate professor at the Department of «Instrument making and mechatronics» Kazan State Power Engineering University.