

УДК 004

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Петров Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного проектирования и дизайна ФГБОУ высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Бактыбеков Чынгыз Бактыбекович, аспирант кафедры автоматизированного проектирования и дизайна ФГБОУ высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Аннотация

Энергосберегающий синхронный электропривод играет важную роль в реализации задач повышения эффективности, коэффициента полезного действия и производительности труда в разных отраслях сфер деятельности, автоматизации и оптимизации производственных процессов. Разработка математической модели энергосберегающего синхронного электропривода с постоянными магнитами для промышленного оборудования представляет собой расчётную схему движения разных систем масс. Цель данной научной статьи - разработка математической модели энергосберегающего синхронного электропривода с постоянными магнитами для промышленного оборудования. Используемый метод в моделировании безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами был основан исходя из параметров реального приводного ленточного конвейера, с учетом особенностей конструкции высокомоментных двигателей. В работе решаются задачи системы управления энергосберегающего безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами и состоят в том, чтобы найти решение, являющееся допустимым управлением, которое максимизирует выбранный критерий производительности. Это решение является оптимальным управлением и подтверждается достигнутыми результатами в данной работе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синхронный электропривод, безредукторный, эффективный, энергосберегающий, математическая модель, двигатель.

MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY-SAVING EQUIPMENT SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH PERMANENT MAGNETS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

Petrov Andrey Yevgenievich, Ph.D & D.Sc., Professor of Department of Computer aided design and engineering design, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

Baktybekov Chyngyz Baktybekovich, Post-graduate student of Department of Computer aided design and engineering design, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

Abstract

Energy-saving synchronous electric drive plays an important role in the implementation of the tasks of increasing efficiency, efficiency and labor productivity in various industries, automation and optimization of production processes. The development of a mathematical model of an energy-saving synchronous electric drive with permanent magnets for industrial equipment is a calculated scheme of movement of different mass systems. The purpose of this scientific article is to develop a mathematical model of an energy-saving synchronous electric drive with permanent magnets for industrial equipment. The method used in the simulation of a gearless synchronous electric drive with permanent magnets was based on the parameters of a real drive belt conveyor, taking into account the design features of high-torque motors. The paper solves the problems of the control system of an energy-saving gearless synchronous electric drive with permanent magnets and consists in finding a solution that is an acceptable control that maximizes the selected performance criterion. This solution is optimal control and is confirmed by the results achieved in this work.

KEYWORDS: synchronous electric drive, gearless, efficient, energy-saving, mathematical model, motor.

Введение

Разработка и применение энергосберегающих технологий, в частности, электроприводов, их применение в промышленности и производстве электромобилей, является необходимым условием для обеспечения устойчивого инновационного развития.

В настоящее время энергосберегающие безредукторные синхронные электроприводы с постоянными магнитами применяются в промышленности и в производстве электромобилей из-за их выдающихся технических характеристик. Энергосберегающие электроприводы обладают высокой эффективностью, высокой мощностью и большим отношением крутящего момента к весу электропривода. Электропривод является одним из крупнейших потребителей электрической энергии. На электроприводы приходится более 70% вырабатываемой электроэнергии, которая преобразуется в механическую энергию привода, большая часть которой доставляется нерегулируемому электроприводу. Только около 10% составляет доля электроэнергии, потребляемой регулируемым электроприводом. В мировой практике основная тенденция – это переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому электроприводу там, где в основном применялся нерегулируемый электропривод [4]. По мнению экспертов, регулируемый электропривод необходим в 50% всех случаев использования электропривода [1].

1. Система управления энергосберегающего синхронного электропривода с постоянными магнитами для промышленного оборудования

Высокопроизводительная система управления синхронного безредукторного электропривода с постоянными магнитами требует хорошей реакции слежения, устойчивости к помехам, адаптации к изменениям параметров и широкого диапазона регулируемых скоростей. Векторная диаграмма декомпозиции тока на основе начального положения ротора представлена на рис. 1. Поэтому для повышения производительности систем было предложено множество регуляторов скорости, таких как самонастраивающийся регулятор.

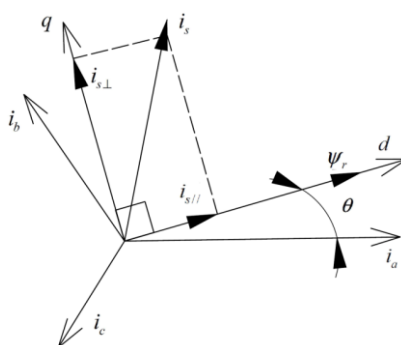


Рис. 1. Векторная диаграмма декомпозиции тока на основе начального положения ротора

Для энергосберегающего безредукторного электропривода с постоянными магнитами используется большое количество синхронных приводов. Контроль энергосбережения имеет важное экономическое значение для промышленных предприятий и ключевой проблемой системы управления энергосбережения для синхронного электропривода заключается в том, как разложить ток статора путем точной оценки положения и скорости ротора [5]. Затем формируется двойной замкнутый контур управления током и скоростью статора, чтобы ток статора проводил двигатель в движение как весь крутящий момент.

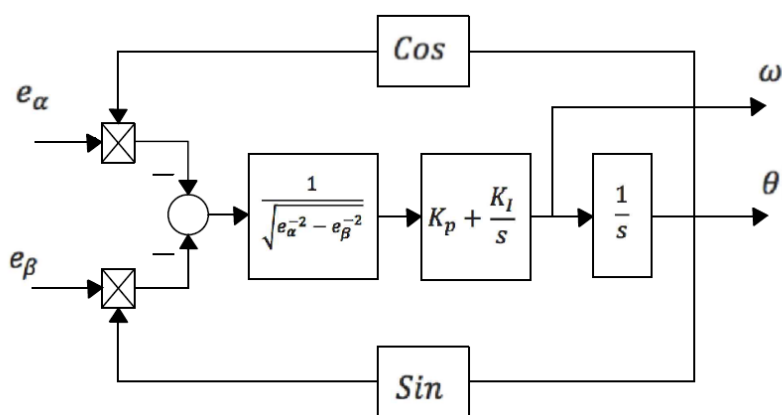


Рис. 2. Структура фазовой автоподстройки частоты

Предложенный на рис. 2 алгоритм оценки может использовать текущую модель энергосберегающего синхронного безредукторного электропривода в качестве эталонной модели для оценки частоты вращения и положения ротора на этапах пуска. Он не зависит от обратной электродвижущей силы, которая используется общим алгоритмом оценки. Однако сопротивление будет меняться с изменением температуры обмоток статора, и эти изменения приведут к тому, что модель опорного тока будет неточной и повлияет на точность оценки частоты вращения и положения ротора. Таким образом, алгоритм оценки запуска переключается на предложенный алгоритм оценки работы, основанный на теории скользящего режима и не зависящий от параметров двигателя. Преимущества алгоритма оценки запуска и алгоритма оценки работы объединяются для формирования гибридного контроллера. Этот гибридный контроллер осуществляет точную оценку скорости и положения ротора от запуска до достижения максимального крутящего момента [3].

2. Моделирование системы управления энергосберегающего безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами

Моделирование системы управления энергосберегающего безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами для промышленного оборудования выполняется методом конечных элементов. Постоянные магниты, чередующиеся с

электромагнитами, по катушкам которых протекает постоянный электрический ток, необходимы для создания магнитного поля в энергосберегающих безредукторных синхронных электроприводах. Синхронные электроприводы с постоянными магнитами используются в качестве электродвигателя и мотор-генератора переменного тока. Математическая модель энергосберегающего безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами в осях d - q , на основе которой будет осуществляться система управления синхронным электроприводом, содержит следующие уравнения:

$$U_{sd} = R_s i_{sd} - \left(\frac{d\psi_{sd}}{dt} \right) = R_s i_{sd} + L_{sd} \left(\frac{dI_{sd}}{dt} \right) - \omega_{0el} L_{sq} I_{sq},$$

$$U_{sq} = R_s i_{sq} - \left(\frac{d\psi_{sq}}{dt} \right) = R_s i_{sq} + L_{sq} \left(\frac{dI_{sq}}{dt} \right) + \omega_{0el} L_{sd} I_{sd} + \omega_{0el} \psi_{PM},$$

$$M_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_{PM} I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}],$$

$$\omega_{0el} = \frac{1}{J} (M_e - M_c).$$

Принцип скалярного управления прост: он основывается на пропорциональном изменении функции частоты и амплитуды питающего напряжения, причем отношение напряжения к частоте оказывается практически постоянным, также характеризуется своей простотой и быстроедействием, но не подходит для управления безредукторным синхронным электроприводом с постоянными магнитами, потому как не учитывается динамика синхронного электрического привода при регулировании, а также задействуются статические модели установившихся режимов работы. Одним из самых эффективных методов управления синхронного электропривода на низкой скорости является полеориентированное управление. Для подачи импульсов нужной величины на источники инвертора обычно используется пространственная векторная модуляция или широтно-импульсная модуляция [2].

Схема датчикового векторного управления энергосберегающим синхронным электроприводом с постоянными магнитами по принципу полеориентированного управления с широтно-импульсной модуляцией и нулевым током статора по оси d показана на рисунке 3.

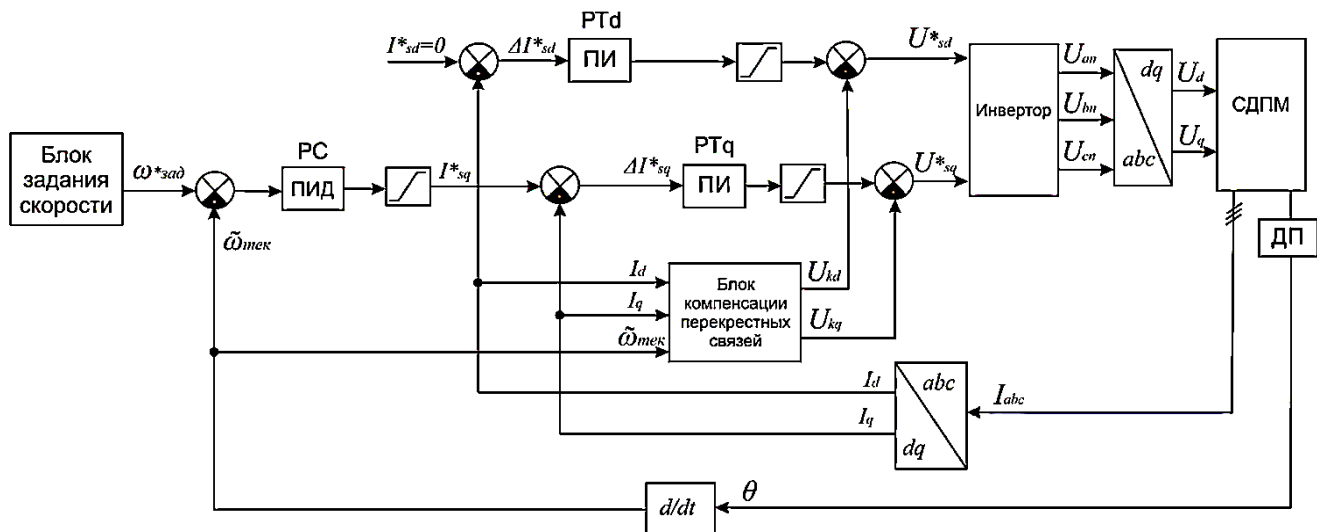


Рис. 3. Система управления энергосберегающего синхронного электропривода с постоянными магнитами

Общая математическая модель энергосберегающего безредукторного синхронного электропривода с постоянными магнитами в синхронной системе отсчета (d, q) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L_d}i_d - \frac{L_q}{L_d}\omega_r i_q + \frac{1}{L_d}u_d \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{\theta_r L_d}{L_q}i_d - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{\psi_0}{L_q}\omega_r + \frac{1}{L_q}u_q \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J}T_e - \frac{F}{J}\omega_e - \frac{p}{J}T_l \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r\end{aligned}$$

С электромагнитным крутящим моментом:

$$T_e = \frac{3p\psi_0}{2}i_q + \frac{3p(L_q - L_d)}{2}i_q i_d$$

Заключение

Рассмотрены вопросы математического моделирования системы управления энергосберегающего безредукторного электропривода с постоянными магнитами для промышленного оборудования, связанные с уникальностью его конструкции, методиками вычисления и исследования электромагнитных и электротехнических процессов. Представлены результаты моделирования синхронного привода с постоянными магнитами для приводного энергосберегающего безредукторного мотор-барабана ленточного конвейера, а также создание плавного пуска для системы скалярного управления по

принципу полеориентированного управления с широтно-импульсной модуляцией и нулевым током статора. Таким образом, показаны преимущества данного электропривода и возможности его практического применения.

Литература

1. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления: учеб. пособие / В.Н. Поляков; – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 256 с.
2. Поляков В.Н. Математические модели двигателей постоянного тока для задач управления: Учебное пособие / В.Н. Поляков; Екатеринбург: УГТУ, 1999. 161 с.
3. Валов А.В. Методы автоматизированного проектирования электропривода: Учебное пособие. / Валов А.В. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 73 с.
4. Петухов С.В. Электропривод: Учебное пособие. / сост. С.В. Петухов: Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303 с.
5. Conveyor Equipment Manufacturers Association / “Universal Method” for Belt Tension Calculation, 2005. – 129 pp.