

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ВРАЩЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С КОМПЬЮТЕРНОЙ ПОДСИСТЕМОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СКОРОСТЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ПЕТРОВ П.А., ИВЕЛЬ В.П., ГЕРАСИМОВА Ю.В.,
АУБАКИРОВА Г.Ф., МОЛДАХМЕТОВ С.С., ГАГОЛИНА О.С.

Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева

Аннотация: Статья посвящена методике разработки энергоэффективной системы управления двухдвигательным механизмом вращения крупногабаритных объектов, где два асинхронных двигателя работают по принципу «ведущий» – «ведомый». Блок управления представляет собой синтез микроконтроллера ATmega 2560 и компьютерной Simulink-модели двухдвигательного асинхронного электропривода. Адаптивность системы обусловлена идентификацией электромеханической постоянной времени каждого двигателя, что наравне с использованием прецизионных датчиков углового перемещения позволяет осуществить точную подстройку количества оборотов обоих двигателей.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, микроконтроллерное управление, Simulink-модель, адаптация, оптимизация, подсистема регулятора скорости, автоматизированная система управления

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE ROTATION MECHANISM OF LARGE-SIZED OBJECTS WITH A COMPUTER SUBSYSTEM FOR SYNCHRONIZING THE SPEEDS OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: The article is devoted to the method of developing an energy-efficient control system for a two-motor rotation mechanism OF large objects, where two asynchronous motors operate on the "master" – "slave" principle. The control unit is a synthesis of an ATmega 2560 microcontroller and a computer Simulink model of a two-motor asynchronous electric drive. The adaptability of the system is BASED ON the identification of the Electromechanical time constant of each engine, which, along with the use of precision angular displacement sensors, allows for accurate adjustment of the number of ROTATIONS of both engines.

Key words: asynchronous electric drive, microcontroller control, Simulink model, adaptation, optimization, speed controller subsystem, automated control system.

АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫҢ ЖЫЛДАМДЫҚТАРЫН СИНХРОНДАУДЫҢ КОМПЬЮТЕРЛІК ІШКІ ЖҮЙЕСІМЕН ІРІ КӨЛЕМДІ ОБЪЕКТІЛЕРДІҢ АЙНАЛУ МЕХАНИЗМІН БАСҚАРУДЫҢ АДАПТИВТІ ЖҮЙЕСІ

Аңдатпа: Мақала ірі габаритті объектілердің екі қозғалтқышты айналу механизмін басқарудың энергия тиімді жүйесін әзірлеу әдістемесіне арналған. Осы жүйеде екі асинхронды қозғалтқыш "жетекші" – "еруші" қағидасы бойынша жұмыс жасайды. Басқару блогы екі қозғалтқышты асинхронды электр жетегінің компьютерлік Simulink моделі мен atmega 2560 микроконтроллерінің синтезі болып келеді. Жүйенің бейімделуі әр қозғалтқыштың электромеханикалық уақыт тұрақтысын анықтауға байланысты, ол дәл бұрыштық қозғалыс датчиктерін қолданумен қатар, екі қозғалтқыштың айналу санын нақты реттеуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: асинхронды электржіетек, микроконтроллерлі басқару, Simulink-модель, бейімдеу, оңтайландыру, жылдамдықты реттегіштің кіші жүйесі, автоматтандырылған басқару жүйесі

Введение

Системы двухдвигательных асинхронных электроприводов являются достаточно распространенными для производственных комплексов. Такие системы могут быть использованы в конвейерных установках, лифтовых системах или устройствах поворотов крупных объектов. В работе [1] представлены методики проектирования таких систем.

В работе [2] рассмотрен такой способ на основе бездатчиковых систем управления. Этот метод основан на составлении математической модели исполнительного механизма (электродвигателя). Такой способ является достаточно сложным, т.к. он основан на определении скоростей роторов на основе системы дифференциальных уравнений.

В работе [3] используется датчик определения угловой скорости ротора «ведущего» электропривода. Скорость ротора «ведомого» электропривода управляется на основе измеренной скорости ротора «ведущего» электропривода. Такой метод достаточно удобен, но усложнен фактом, что затрачивается большее время на синхронизацию скоростей роторов двухдвигательной системы. Это приводит к тому, что переходный процесс стабилизации скоростей становится большим.

Существует и третий способ управлением скоростей роторов двухдвигательного асинхронного электропривода [4]. Данный способ также основан на принципе синхронизации двух асинхронных двигателей по системе «ведущий» – «ведомый». Однако такая система обладает недостаточным быстродействием и не позволяет осуществить точную синхронизацию количества оборотов роторов двух двигателей. Это происходит из-за отсутствия прецизионных цифровых датчиков углового смещения роторов обоих двигателей.

Таким образом возникает необходимость разработки адаптивной системы асинхронного двухдвигательного электропривода. Основа разрабатываемого метода заложе-

на в дополнительных блоках регулирования и синхронизации скоростей. Также разработанная система будет использовать метод эталонной модели асинхронного электропривода. Подобный метод рассмотрен в работе [5].

На рисунке 1 изображена функциональная схема разработанной адаптивной системы управления двухдвигательным электроприводом механизма вращения крупногабаритных объектов. Анализ работы такой системы приводился авторами в работе [6].

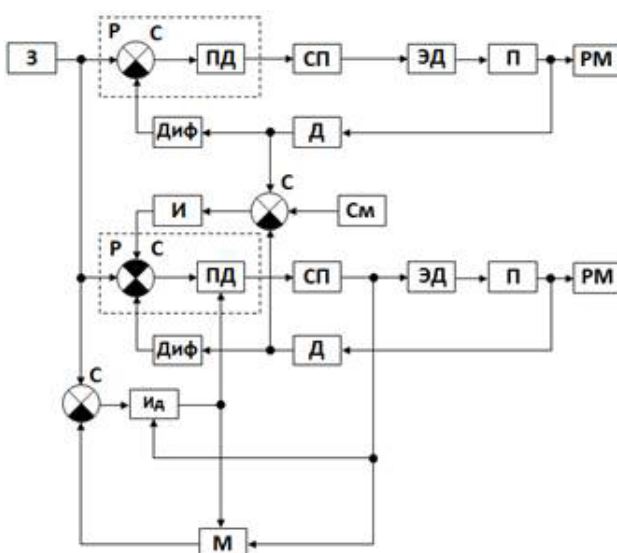


Рис. 1 – Функциональная схема адаптивной системы двухдвигательного электропривода

На приведенной схеме присутствуют следующие сокращения:

З – общий задатчик скорости двух электроприводов; Р – системы регуляторов скоростей для двух электроприводов; С – сумматоры; ПД – пропорционально-дифференцирующие звенья; СП – силовые преобразователи; ЭД – асинхронные электродвигатели; П – передаточные механизмы (редуктора); РМ – рабочие механизмы; Д – прецизионные датчики углового смещения; Диф – дифференциаторы; См – задатчик углового смещения; И – интегратор; Ид – идентификатор математической модели асинхронного электропри-

вода; M – эталонная математическая модель асинхронного электропривода.

Работа данной функциональной схемы основана на следующем алгоритме. Объектами управления являются два взаимосвязанных электродвигателя, один из которых является «ведущим», другой «ведомым». Скорости первого и второго ротора задаются общим задатчиком скоростей на входе системы. Прецизионные датчики фиксируются на обоих роторах и измеряют их угловые перемещения. Дифференциаторы выполняют роль преобразователей углового перемещения в угловые скорости. Измеренные угловые скорости вычитаются из программно-заданной скорости на входе системы. Это позволяет вычислить отклонение скорости первого и второго ротора. На основе этих отклонений пропорционально-дифференцирующими блоками корректируются скорости обоих электродвигателей.

После прохождения через силовые полупроводниковые преобразователи, сигналы отклонений поступают на каждый электродвигатель. Вращение выходных валов посредством редукторов передаются на роторы каждого электродвигателя.

Точная синхронизация количества оборотов роторов обоих электродвигателей обеспечивается задатчиком углового смещения. При вращении крупных объектов это соотношение задается равным 0 в целях устранения дополнительных динамических нагрузок.

Также в систему введен блок сумматора, вычисляющий разность в углах поворота обоих роторов и заданным значением:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_{3Д}. \quad (1)$$

Сигнал на выходе задатчика углового смещения интегрируется, а затем поступает на другой сумматор, входящий в состав регулятора второго электропривода. Таким образом реализуется отрицательная обратная корректирующая связь по разнице угловых перемещений первого и второго роторов. Работа этих блоков поддерживает высокую точность при регулировании заданного

отклонения угла поворота ротора «ведомого» электродвигателя.

Включение дополнительных блоков идентификации и адаптации позволяет повысить быстродействие переходных процессов и точность управления в установившихся режимах.

Зависимость между напряжением питания (выход корректирующего звена) U и скоростью вращения ротора ω можно представить следующим линеаризованным дифференциальным уравнением:

$$T_{ЭП} \frac{d\omega}{dt} - \omega = kU, \quad (2)$$

где $T_{ЭП}$ – электромеханическая постоянная времени электропривода (параметр идентификации);

U – управляющее напряжение (ШИМ-сигнал);

ω – угловая скорость ротора электродвигателя;

k – пропорциональный коэффициент усиления (определяется экспериментально).

С помощью преобразований передаточную функцию каждого электропривода как объекта управления можно представить в следующем виде:

$$W_{ЭП}(p) = \frac{k}{T_{ЭП}p + 1}, \quad (3)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования Лапласа. При этом необходимо добиться компенсации инерционности каждого электропривода. Для этого корректирующие звенья выбирают именно пропорционально-дифференцирующими. Такие звенья определяются следующей передаточной функцией:

$$W_K(p) = T_K p + 1, \quad (4)$$

где $T_K = T_{ЭП}$. В данной адаптивной двухдвигательной системе предусмотрена автоматическая настройка параметра T_K . Настройка осуществляется в передаточной функции (4) с помощью математических моделей электроприводов и блока идентификации. Математическая модель, используемая в схеме 1, представляет собой выражение (3).

Очевидно, что необходима идентификация параметра электрохимической постоянной времени ТК. Этот параметр в дальнейшем необходим для его подстройки под аналогичный параметр ТЭП. Все это позволит изменять передаточную функцию пропорционально дифференцирующего звена (4). Таким образом с достаточной достоверностью достигается приближение передаточной функции системы управления к пропорциональному звену. В дальнейшем это позволит осуществить точную синхронизацию скоростей двух электродвигателей и повышение быстродействия системы.

Экспериментальная часть

Функциональную схему (рисунок 1) можно реализовать в программе MatLab 2013. Подобная Simulink-модели представлена в работе [7]. На рисунке 2 представлена ком-

пьютерная модель, полностью отражающая вышеописанный алгоритм.

На рисунке 2 пропорционально-дифференцирующие блоки реализованы звеньями gain1, derivate и gain2, derivate1. 10 – пропорциональный коэффициент усиления блока gain интегрированной разности углового смещения (подобран экспериментально). Speed reference – общий задатчик скоростей. Load torque и load torque1 – задатчики электрохимического момента на оба электропривода. С помощью блоков Scope и Scope2 можно наблюдать осциллограммы изменения количества оборотов роторов RPM и нагрузочный момент M.

Space Vector PWM – подсистемы регуляторов скорости на основе идентификации электрохимической постоянной времени каждого электропривода (рисунок 3).

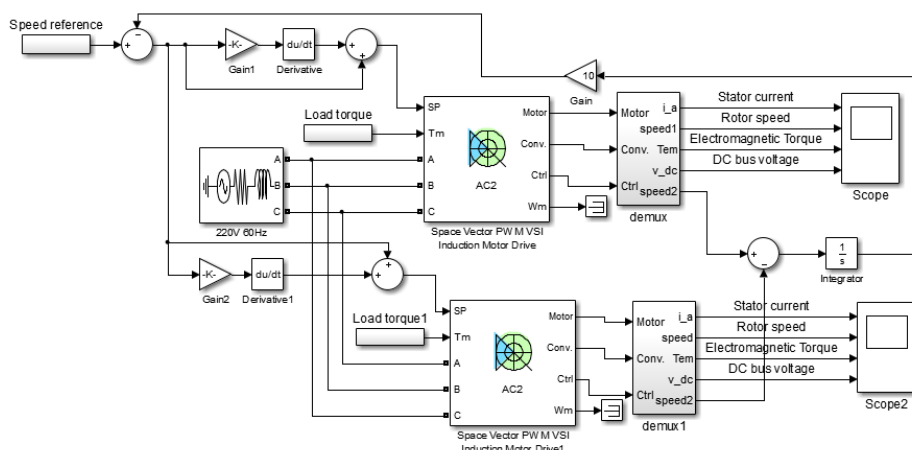


Рис. 2 – Система двухдвигательного электропривода с корректирующей обратной связью на основе пропорционально-дифференцирующих звеньев

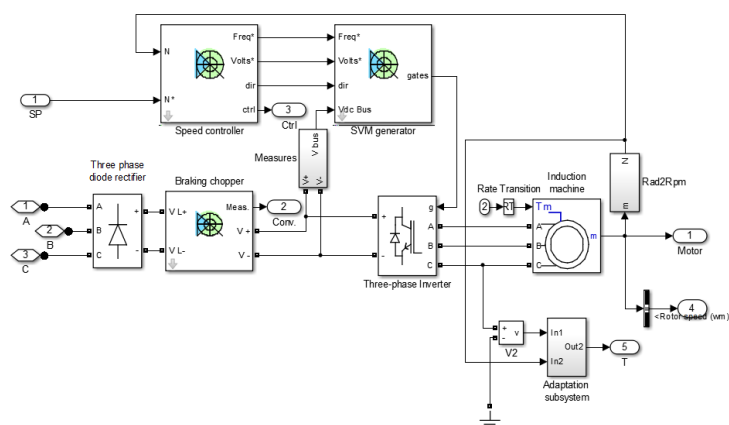


Рис. 3 – Подсистема регулятора скорости, идентичная для обоих электроприводов

Метод регулирования скоростей в данном случае основан на пространственно-векторной модуляции. Такой метод рассмотрен в работе [8]. Этот метод основан на генерации векторов напряжений для коммутации полупроводникового трехфазного инвертора. С выхода инвертора управляющий сигнал поступает на обмотки электродвигателя (induction machine). На рисунке 3 подсистема адаптации позволяет определить электро-механическую постоянную времени каждого электропривода и использовать ее в настройке математической модели электродвигателей в выражении (3). Подсистема идентификации интегрирована в подсистему регулятора скорости каждого электропривода. На вход In1 подается однофазное напряжение питания электродвигателя, а на вход In2 – число оборотов ротора электродвигателя. Выходным параметром является электро-механическая постоянная времени электропривода Т.

Компьютерные модели на рисунках 2 и 3 можно использовать в качестве графического программного кода для 8-разрядного микроконтроллера ATmega 2560. Данный микроконтроллер оснащен встроенным 10-битным аналого-цифровым преобразователем и 54 цифровыми входами-выходами. Такая архитектура позволяет реализовать данный алгоритм регулирования скоростей. То есть микроконтроллер будет осуществлять управление системой, а элементами управления являются два взаимосвязанных асинхронных электродвигателя. В качестве модуля управления можно использовать плату Arduino Mega 2560, которая поддерживает коммуникацию с MatLab 2013. Плата Arduino Mega 2560 можно использовать в качестве управляющего объекта с загруженной Simulink-моделью. Такой подход основан на возможности MatLab 2013 интерпретации графического кода в язык C++. Подобный подход был реализован в работе [9].

В качестве прецизионных датчиков углового смещения в проекте использовались ЛИР-390А,Ф. Эти датчики представляют собой оптические инкрементные энкодеры.

Внешний вид ЛИР-390А,Ф изображен на рисунке 4.



Рис. 4 – Внешний вид датчика ЛИР-390А,Ф

Разработанный стенд для эксперимента представляет собой синтез следующих элементов: плата Arduino Mega 2560 в качестве управляющего контроллера, установленных на обоих роторах энкодеров, силовых преобразователей, редукторов и поворотной рамы для крепления объекта вращения. В качестве макета крупногабаритного объекта используется вагон, закрепленный на поворотной раме. Питание электродвигателей осуществляется с помощью отдельного блока на 220В с полупроводниковым преобразователем частоты. Управление может осуществляться как от персонального компьютера (для введения значений начальной скорости и начального нагрузочного момента), так и автономно. В качестве экспериментальных электродвигателей выбраны маломощные (20 кВт) асинхронные двигатели 4АХ80А4У3. Такие электродвигатели позволяют осуществить энерго-эффективный режим.

На рисунке 5 изображена разработанная экспериментальная установка.

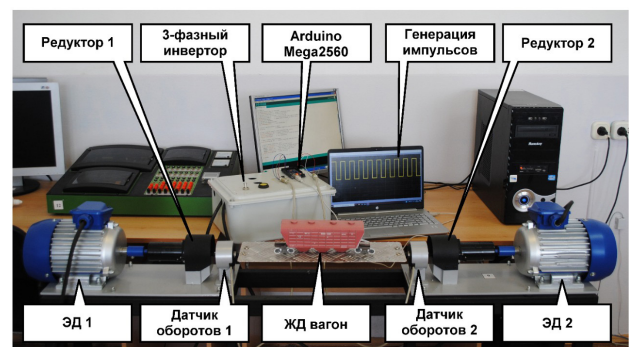


Рис. 5 – Разработанный стенд с поворотной рамой

На рисунках 6 и 7 изображены результаты моделирования для двухдвигательного электропривода с подсистемой идентификации электромеханической постоянной времени T и подсистемой адаптации к изменяющимся параметрам электромеханической системы. Осциллограммы сняты с блоков Scope и Scope 2 на рисунке 2.

Как видно из рисунков 6 и 7 время переходного процесса (окончательная синхронизация количества оборотов обоих роторов, примерно 1390 оборотов в минуту) состав-

ляет около 2 секунд. Такой результат обусловлен тем, что программа MatLab (при управлении от компьютера) обращается к большому количеству пакетов данных и драйверов, что затормаживает систему. При этом регистрируются перепады электромагнитного динамического момента на «ведущий» электропривод, что может привести к перегрузке всей системы. Это может привести к опрокидыванию вращаемого объекта. Чтобы увеличить быстродействие системы и устранить колебания электромагнитного момен-

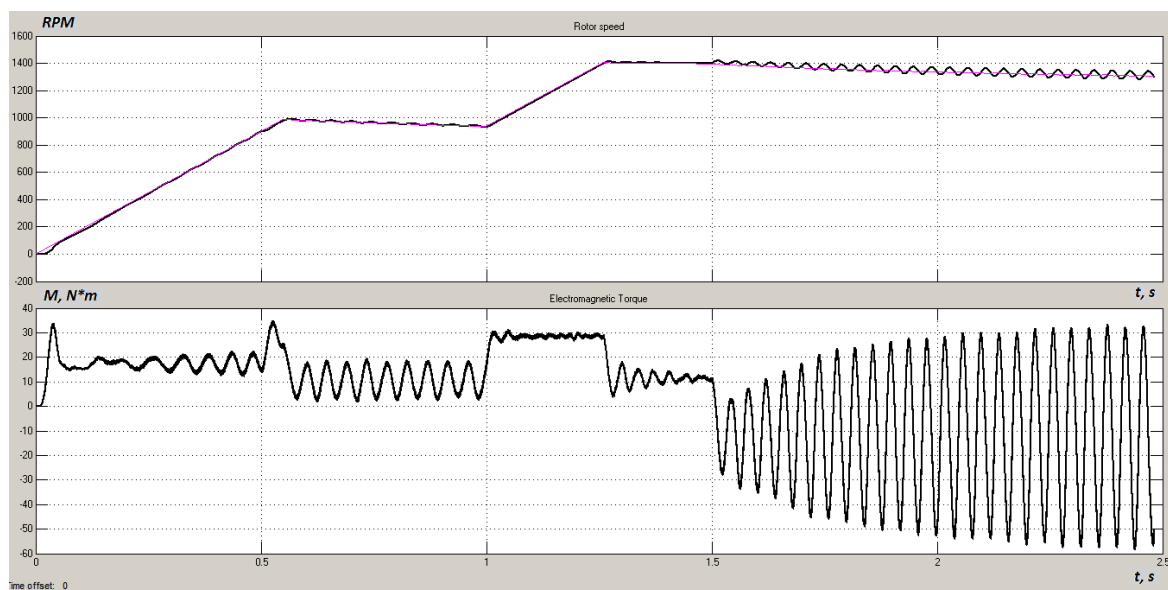


Рис. 6 – Результаты моделирования работы «ведущего» электродвигателя адаптивной системы управления

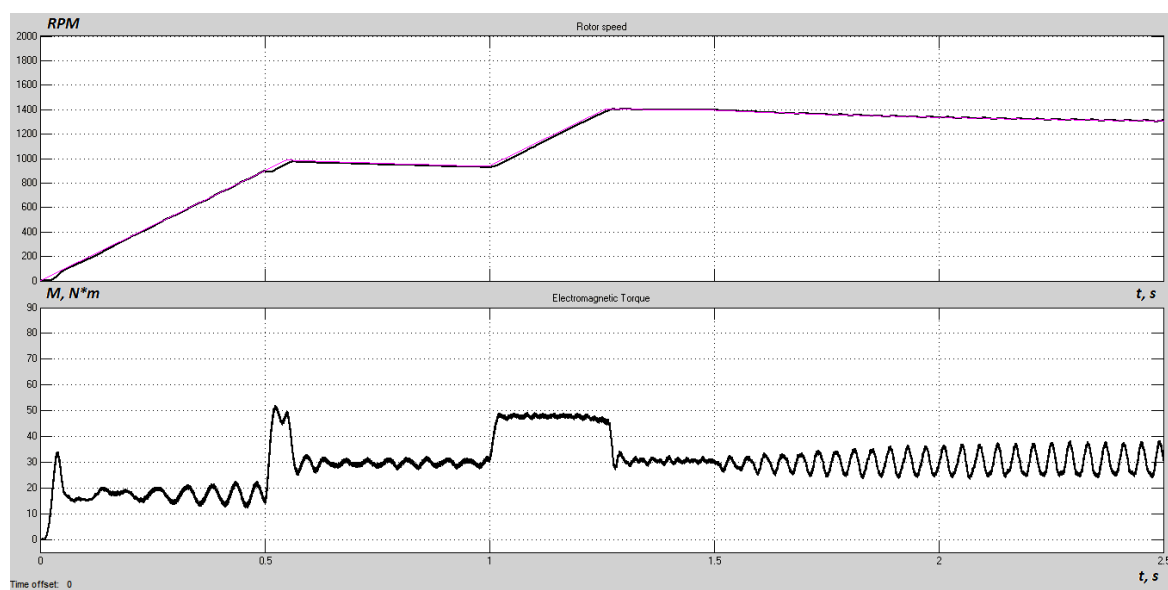


Рис. 7 – Результаты моделирования работы «ведомого» электропривода адаптивной системы управления

та предполагается в дальнейшем использовать более мощные микропроцессоры с наличием 12-битного АЦП в качестве блока управления.

Результаты и обсуждение

Приведенные в статье теоретические выкладки подтвердились экспериментальным путем. Было доказано, что для эффективной синхронизации скоростей и количества оборотов роторов двух взаимосвязанных электродвигателей необходимо идентифицировать постоянную электромеханическую времени обоих электроприводов. Этот параметр в дальнейшем используется в качестве переменной в математической модели асинхронного двигателя. Такой подход позволяет определить отклонение между обоими роторами и добиться относительно быстрого переходного

процесса синхронизации скоростей обоих асинхронных двигателей.

Заключение

Микроконтроллер AtMega2560 не позволяет добиться необходимого быстродействия (0,5 – 0,6 секунд) для синхронизации количества оборотов двух роторов в двухдвигательной системе. 10-битный АЦП ATMega2560 не дает высокоточного измерения угловых перемещений двух роторов.

В качестве оптимизации работы системы управления двухдвигательным асинхронным электроприводом стоит использовать микропроцессор SAM3X8E ARM Cortex-M3 с 12-битным АЦП в наличии. Результаты моделирования системы на основе SAM3X8E ARM Cortex-M3 были рассмотрены авторами в статье [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Schier, M. Hubner, N. Kevlishvili, A. Dietz and S. Hörlin, "Methodical approach for designing electric propulsion systems containing two motors," 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2017, pp. 1-9, doi: 10.1109/EVER.2017.7935893.
2. H. He and J. Xing, "Design of Induction Motor Speed-Sensorless Vector Control System," 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Xi'an, 2016, pp. 563-566, doi: 10.1109/IS3C.2016.145.
3. A. Hingmire and B. B. Pimple, "Simulation and Analysis Studies of Speed Control of Brushless DC Motor Using Hall Sensors," 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS), Nagpur, 2018, pp. 384-387, doi: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536062.
4. S. P. Das and R. K. Gupta, "Direct torque control (DTC) of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) with and without speed/position sensors," India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), New Delhi, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICPE.2011.5728122.
5. J. Soltani and B. Mizaeian, "Simultaneous speed and rotor time constant identification of an induction motor drive based on the model reference adaptive system combined with a fuzzy resistance estimator," 1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings., Perth, WA, Australia, 1998, pp. 739-744 Vol. 2, doi: 10.1109/PEDES.1998.1330693.
6. Petrov, P., Gerasimova, Y., Ivel, V. and Moldakhmetov, S. "System of lifting and rotation of railway cars". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, pp. 714-717 Vol 13(2).
7. A. Dumitrescu, D. Fodor, T. Jokinen, M. Rosu and S. Bucurenciu, "Modeling and simulation of electric drive systems using Matlab/Simulink environments," IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272), Seattle, WA, USA, 1999, pp. 451-453, doi: 10.1109/IEMDC.1999.769143.

8. H. Purnata, M. Rameli and A. K. R. Effendie, "Speed control of three phase induction motor using method hysteresis space vector pulse width modulation," 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, 2017, pp. 199-204, doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124080.
9. S.K. Guha, S. Bhattacharya, P. Y. Nabhiraj and C. Nandi, "Design and Development of Atmega 2560 AVR Microcontroller Based Control and Monitoring System of a Two Jaw Slit," 2019 3rd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech), Kolkata, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEMENTech48150.2019.8981123.