

УДК 621.3.078

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MEXBIOS DEVELOPMENT STUDIO

Солодкий Е.М., Терёхин А.А., Юсупов И.Р.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, e-mail: wsdl00@gmail.com*

Рассматривается пример проектирования и разработки датчиковой системы векторного управления с регуляторами скорости и тока для электромеханической системы управления с асинхронным двигателем, который предназначен для лабораторных и практических занятий. Рассмотрена структура векторной системы управления асинхронным двигателем с ориентацией по вектору потокоцепления ротора. Уделяется особое внимание возможности использования учебных стендов на базе современных схемотехнических решений в образовательных целях и объединения программной и аппаратной частей в виде отдельных узловых блоков в среде визуального программирования MexBIOS Development Studio. Наглядность восприятия обеспечивается единообразной структурой векторной системы управления и простотой реализации алгоритмов. В статье предложены способы и модели, позволяющие перед непосредственной реализацией на микропроцессоре проводить отладку проектируемых систем управления.

Ключевые слова: процессор цифровой обработки сигналов, асинхронный двигатель, наблюдатель угла, вычислитель потокоцепления ротора, система визуального программирования

CREATION OF THE VECTOR CONTROL SYSTEM WITH USE MEBIOS DEVELOPMENT STUDIO

Solodkiy E.M., Terekhin A.A., Yusupov I.R.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: wsdl00@gmail.com

A sample of the design and development of the sensor vector control system of speed and current regulators for the induction motor is considered in this article. It can be designed to work in practical and laboratory classes. Considered structure of vector control system of induction motor with the direction on the vector of the rotor flux is proposed. Great attention is given possibilities of operation educational stands with up to date circuit solution in educational program and software and hardware element in the form of single blocks in the MexBIOS Development Studio visual programming environment. Visual perception is a uniform structure of vector control system, as well as simplicity of representation of algorithms. The article suggests methods and models before allowing the immediate the development on the microcontroller conduct tuning design of control systems.

Keywords: digital signal processor, induction motor, rotor flux angle observer, rotor flux calculator, visual programming system

Учебные стенды и визуальная среда разработки и моделирования *MexBIOS* позволяет проектировщикам устройств абстрагироваться от программирования микроконтроллеров и сосредоточиться на оптимальной реализации задач управления. *MexBIOS* позволяет выполнять практически полный цикл проектирования встроенного программного обеспечения микроконтроллеров: от предварительного моделирования разрабатываемой системы и пробных запусков на макетах, и до работ по сопровождению производства, внесению изменений в выпускаемую продукцию. Основная область применения разработанного продукта – системы управления электродвигателями и устройствами автоматизации, однако примененный подход универсален и для других направлений. Учебные стенды могут быть использованы при обучении бакалавров, магистров, на курсах повышения квалификации по электротехническим направлениям и специальностям, в первую очередь «Электротехника, электромехани-

ка, электротехнологии», «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» и др., а также для научных исследований в ходе аспирантской подготовки.

В данной работе рассматривается пример проектирования и реализации датчиковой системы векторного управления с синтезом регуляторов скорости и тока для асинхронного двигателя, который может быть использован в лабораторных и практических занятиях. Работа студентов со стендами и учебными комплектами предполагает изучение современных схемотехнических решений для задач проектирования систем управления асинхронным двигателем (векторное управление и прямое управление моментом) [5]. Следующий шаг в обучении – это непосредственная реализация алгоритмов управления. Задача построения полноценной векторной системы управления сложна и при использовании языков высокого уровня, таких как C++, предполагает длительный процесс программирования и отладки. На языке визуального про-

ектирования *MexBIOS Development Studio* [7] схема управления наглядна и проста для понимания. Ознакомившись же с реально работающей системой управления АД, студент получает практическое задание по адаптации регуляторов исходя из параметров схемы замещения АД [6], которые будут ему выданы. Работа студента предполагает знание основных шаблонов, таких как координатные преобразования, блок векторного ШИМ, блок оценки потокосцепления ротора, опрос и обработка сигналов с АЦП. Дальнейшая практическая задача, которая ставится перед студентом, непосредственный синтез регуляторов, снятие переходных процессов и оценка качества.

Учебный стенд, представленный в данной работе, имеет в своем составе два комплекта процессорных модулей и агрегат из двух двигателей, объединенных валами через муфту с тензометрическим датчиком момента. Двигатели постоянного тока укомплектованы датчиком скорости – энкодером.

Наличие двух спаренных двигателей разного типа позволяет расширить возможности стенда, в плане: обучение программированию встроенных систем, в том числе в среде разработки *MexBIOS Development Studio*, создание алгоритмов и схем управления двумя типами двигателей на одном стенде, исследование статических и динамических режимов работы, исследование и настройка работы электроприводов под нагрузкой. Интерфейсный модуль стенда может быть снабжен процессорами цифровой обработки сигналов (ПЦОС) *TMS320F2812* или *TMS320F2335*.

MexBIOS Development Studio – визуальная среда разработки и моделирования встроенного программного обеспечения систем управления электродвигателями. Используя блоки из палитры компонентов, собирается программа управления электродвигателем. Блоки представляют собой законченные функции управления электродвигателем.

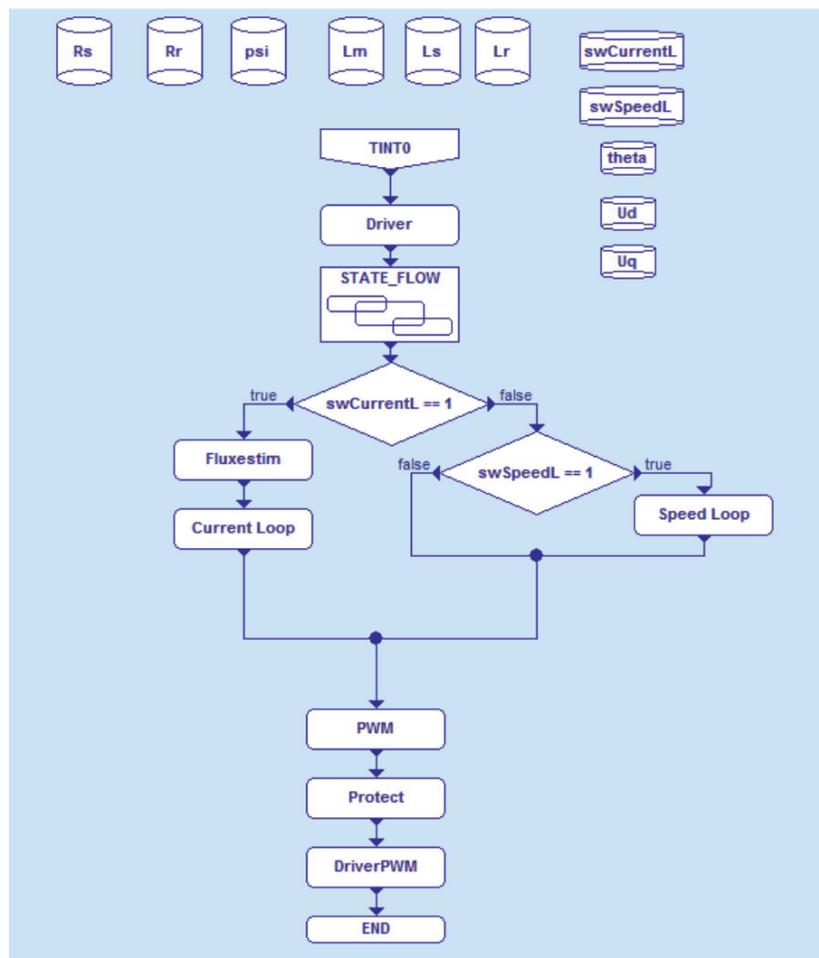


Рис. 1. Структурная схема векторного управления

Основные блоки при реализации векторной системы:

– *Clark* – Блок координатного преобразования из трехфазной симметричной системы координат в двухфазную симметричную систему координат;

– *Park* – Блок координатного преобразования из двухфазной неподвижной системы координат в двухфазную вращающуюся систему координат;

– *Svgendq* – генератор пространственного вектора ШИМ. Блок предназначен для формирования соответствующей длительности включения ключей инвертора, необходимой для создания формы напряжения статора с помощью ШИМ. Форма напряжения статора представляется в неподвижной двухфазной системе координат;

– *ADC* – Драйвер АЦП, для конфигурирования и опроса АЦП микроконтроллера.

Для того чтобы сократить затраты вычислительной мощности процессора при работе с числами, чип работает с числами без плавающей запятой. В микроконтроллерах арифметические операции проводятся с применением фиксированной запятой. Дробные числа преобразуются в целые числа. При этом под представление дробной и целой части числа выделяется различное количество бит слова контроллера. Чип работает с типами данных, такими как *IQ1-IQ24*, где число, стоящее после *IQ* – количество бит выделенных для представления дробной части. При работе с моделью двигателя, не записывая программу в память процессора, используются также форматы *integer* и *float*.

Векторная система управления состоит из трех контуров: контур тока, контур скорости и контур потокосцепления. Частота вызова основных блоков составляет 20 кГц. Блок контура тока и контур потокосцепления работают с частотой 10кГц, а контур скорости – с частотой 5 кГц.

В *MexBios Development Studio* была разработана структурная общая для систем

векторного управления (рис. 2). В данной реализации системы векторного управления реализован автоматический расчет регуляторов тока и скорости по параметрам схемы замещения АД (рис. 1).

Контур тока является внутренним контуром [1, 2, 6]. Для асинхронного двигателя необходимы два регулятора тока для управления двумя составляющими вектора тока. Составляющая *Id* – формирует магнитный поток асинхронной машины, необходимый для формирования момента. Составляющая *Iq* – формирует момент асинхронной машины.

Объединив d-q составляющие тока, уравнения равновесия для АД могут быть записаны в векторной форме (1, 2):

$$L_{\sigma} \frac{d\vec{I}_S}{dt} = \vec{U}_S - (R_S + R_R + j \cdot \omega_e \cdot L_{\sigma}) \times \vec{I}_S - \left(j \cdot \omega_r - \frac{R_R}{L_M} \right) \cdot \vec{\Psi}_R, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} = R_R \vec{I}_S - \left(\frac{R_R}{L_M} + j(\omega_r - \omega_1) \right) \vec{\Psi}_R. \quad (2)$$

В блоке *SpeedLoop* находится регулятор скорости. В контуре *Fluxestim* располагается наблюдатель угла и наблюдатель потока. Рассмотрим реализацию наблюдателя потокосцепления ротора.

Существует два вида наблюдателей потока, в которых для оценки потокосцепления используется модель АД, построенная на основе или векторов тока или векторов напряжения. При этом «токовая модель» по сравнению с «моделью напряжений» является более подходящей для использования на низких скоростях, несмотря на высокую чувствительность к изменению параметров двигателя. В данной работе предлагается рассмотреть реализацию «токовой модели» в полиориентированной системе векторного управления с использованием методов косвенной ориентации во вращающейся системе координат *d-q*.

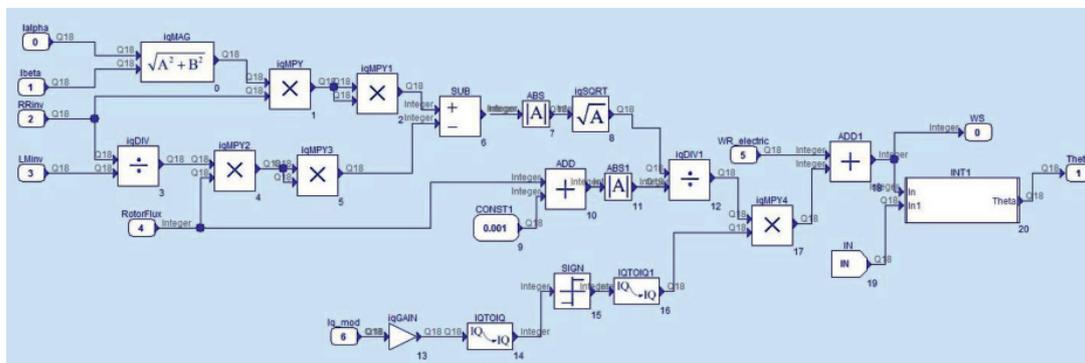


Рис. 2. Реализация наблюдателя угла в среде MexBIOS

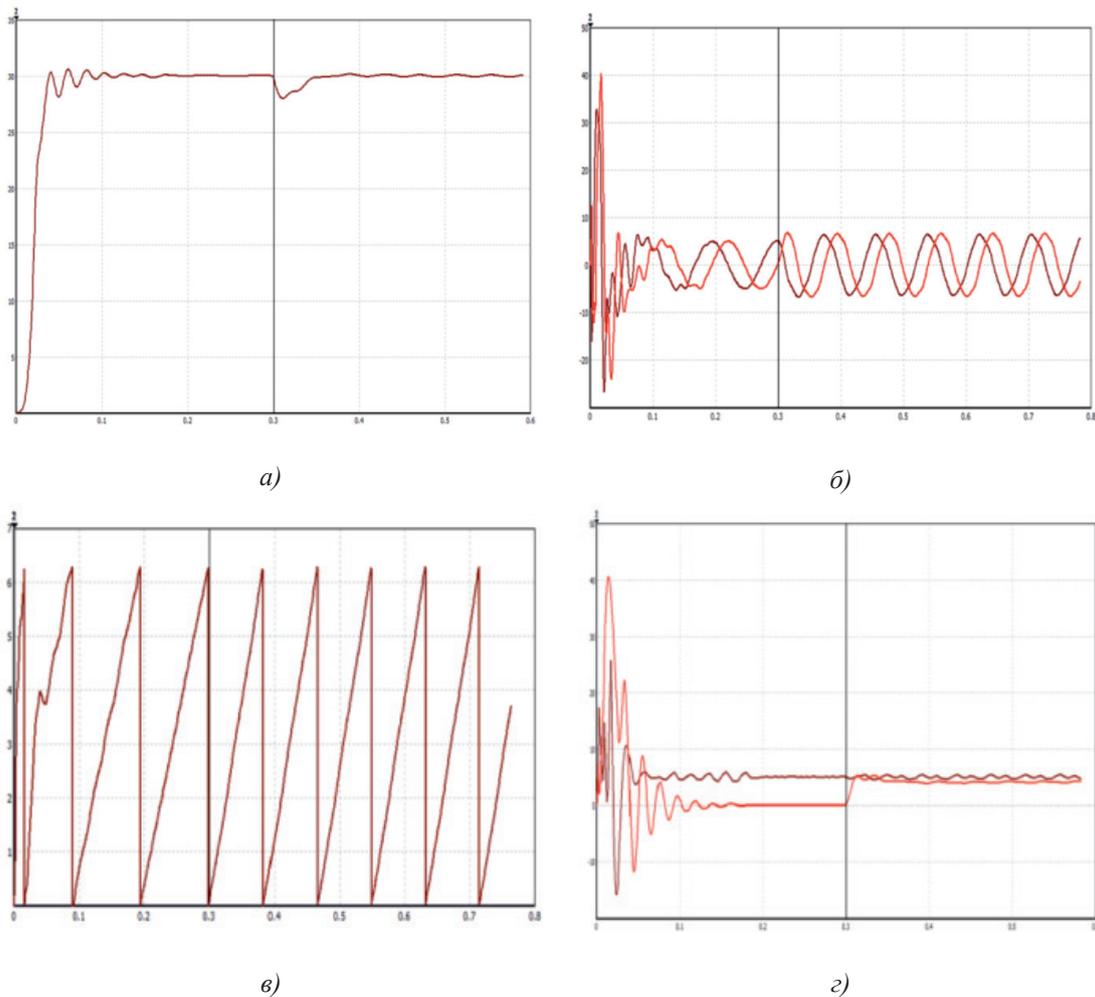


Рис. 3. Графики переходных процессов: а – скорости, б – токов в осях α - β , в – угла θ , з – момента двигателя

Для реализации наблюдателя потокосцепления, с использованием вектора тока \vec{i}_s (в проекциях оси координат d - q) и электрической угловой скорости ротора ω_r в качестве входных сигналов, используем уравнение (1). Выполнив разложение уравнения (1) на реальную и мнимую части и предполагая, что $\vec{\Psi}_R = \Psi_{Rd} + j0$ (требуемая ориентация d - q системы координат), уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$\frac{d\hat{\Psi}_R}{dt} = R_R \cdot I_d - \frac{R_R}{L_M} \cdot \hat{\Psi}_R, \quad (3)$$

$$0 = R_R \cdot I_q - (\hat{\omega}_1 - \omega_r) \cdot \hat{\Psi}_R. \quad (4)$$

Переписав уравнение (3) в интегральной форме, выходные оценки наблюдателя потока (амплитуда, скорость и положение вектора потокосцепления $\vec{\Psi}_R$) можно выразить следующим образом:

$$\hat{\Psi}_R = \int_0^t (R_R \cdot I_d - \frac{R_R}{L_M} \cdot \hat{\Psi}_R) dt, \quad (5)$$

$$\hat{\omega}_1 = \omega_r + \hat{\omega}_2 = \omega_r + \frac{R_R I_{sq}}{\hat{\Psi}_R}, \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_1 = \int_0^t \hat{\omega}_1 dt. \quad (7)$$

Таким образом, полная оценка вектора потокосцепления может быть получена с помощью формул (5–7). На практике при моделировании подобные оценки показали плохие результаты, поскольку при реализации используются токи, полученные из координатных преобразований с использованием угла, который сам участвует в преобразованиях. Таким образом, накапливается ошибка вычисления. В бездатчиковых

системах управления [3, 4] это особенно критично.

Предлагается оценку скорости $\hat{\omega}_1$ выполнить несколько иначе, используя следующее приближение:

$$\hat{\omega}_1 = \left(\frac{\sqrt{(\sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2} \cdot R_R^2)^2 + \left(\frac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_R\right)^2}}{\Psi_R} \right) \cdot \text{sgn}(I_q) + \omega_r, \quad (9)$$

$$\text{sgn}(I_q) = \begin{cases} +1, & \text{если } I_q > 0; \\ 0, & \text{если } I_q = 0; \\ -1, & \text{если } I_q < 0. \end{cases} \quad (10)$$

где I_α, I_β ток в осях координат α - β .

В результате практической реализации рассмотренных способов оценки потокоцепления ротора наиболее точные результаты были получены при использовании выражений (5), (10), (7), которые исключают накопление статической ошибки.

В *MexBIOS Development Studio* был разработан наблюдатель угла потокоцепления ротора по рассмотренной методике, который был успешно проверен на имитационных моделях и стенде.

Графики переходного процесса по скорости, токам в осях α - β , углу θ и моменту, полученные по результатам имитационного моделирования, приведены на рис. 3. При снятии характеристик на 0,3 секунде была добавлена статическая нагрузка 10 Н·м.

В работе был рассмотрен пример проектирования и реализации датчиковой системы векторного управления с синтезом регуляторов скорости и тока для асинхронного двигателя, который может быть использован в лабораторных и практических занятиях. Разработана структурная схема в среде визуального программирования *MexBIOS Development Studio*, которая может быть предложена студентам для дальнейшей доработки по вариативному заданию в лабораторных и практических занятиях. С использованием *MexBIOS Development Studio* достигается наглядность полученных результатов за счет визуальных средств и вывода информации на виртуальные приборы.

Список литературы

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов / Учебник для вузов. – М.: Изд-во «Издательский дом МЭИ», 2015. – 320 с.

$$\frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} = |\vec{\Psi}_R| \cdot e^{j\omega_r t}. \quad (8)$$

Из формулы (2), раскладывая вектора на плоскость, с учетом приближения (8), имеем

2. Даденков Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 3 (11). – С. 117–128.

3. Калачёв Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. [Электронный ресурс]. http://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/kalachev_yu_n_nablyudateli_sostoyaniya_v_vektrornom_elektropr.pdf (дата обращения: 10.02.2016).

4. Костыгов А.М., Даденков Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Бездатчиковое векторное управление вентильным двигателем с коррекцией ошибки вычисления электрического угла // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – № 13–9. – С. 27–33.

5. Костыгов А.М., Зюзев А.М., Солодкий Е.М., Кухарчук А.В., Мудров М.В., Нестеров К.Е. Состояние и перспективы использования аппаратно-программных симуляторов электротехнических комплексов / Электротехника. – 2015. – № 6. – С. 8–12.

6. Костыгов А.М., Солодкий Е.М., Даденков Д.А. Синтез регуляторов тока и скорости в системе векторного управления вентильным электроприводом // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 656–661.

7. MexBIOS Development Studio – визуальная среда разработки и моделирования. [Электронный ресурс]. <http://mechatronica-pro.com/ru/catalog/software/> (дата обращения: 15.02.2016).

References

1. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya jelektroprivodov / Uchebnyy dlja vuzov. M.: Izd-vo «Izdatskij dom MEI», 2015. 320 p.

2. Dadenkov D.A., Solodkij E.M., Shachkov A.M. Modelirovanie sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink // Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnyye tehnologii, sistemy upravlenija. 2014. no. 3 (11). pp. 117–128.

3. Kalachjov Ju.N. Nabljudateli sostojanija v vektornom jelektroprivode. [Jelektroennyj resurs]. http://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/kalachev_yu_n_nablyudateli_sostoyaniya_v_vektrornom_elektropr.pdf (data obrashhenija: 10.02.2016).

4. Kostygov A.M., Dadenkov D.A., Solodkij E.M., Shachkov A.M. Bezdatchikovoje vektornoe upravlenie ventilnym dvigatelem s korrekciej oshibki vychislenija jelektricheskogo ugla // Informacionno-izmeritelnye i upravljajushhie sistemy. 2015. no. 13–9. pp. 27–33.

5. Kostygov A.M., Zjuzev A.M., Solodkij E.M., Kuharchuk A.V., Mudrov M.V., Nesterov K.E. Sostojanie i perspektivy ispolzovanija apparatno-programmnyh simulyatorov jelektrotehnicheskikh kompleksov / Jelektrotehnika. 2015. no. 6. pp. 8–12.

6. Kostygov A.M., Solodkij E.M., Dadenkov D.A. Sintez reguljatorov toka i skorosti v sisteme vektornogo upravlenija ventilnym jelektroprivodom // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–7. pp. 656–661.

7. MexBIOS Development Studio vizualnaja sreda razrabotki i modelirovanija. [Jelektroennyj resurs]. <http://mechatronica-pro.com/ru/catalog/software/> (data obrashhenija: 15.02.2016).