

Математическое описание управления синхронным двигателем с постоянными магнитами для аппаратной реализации на ПЛИС

П.С. Зубков, Н.А. Кулаев

Мордовский государственный университет им Н.П. Огарёва, Саранск

Аннотация: В современной промышленности возрастает необходимость использования синхронного двигателя с постоянными магнитами в приводе исполнительных устройств. Наравне с этим становится актуальным вопрос реализации схем управления такими двигателями: их математическое описание и аппаратная реализация алгоритма для программируемых логических интегральных схем или микроконтроллерное управление. В данной статье приводится математическое описание дискретных элементов системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами для последующей аппаратной реализации в системах автоматического проектирования. Так же рассмотрена целесообразность и преимущества применения программируемых логических интегральных схем для цифрового управления приводом в сравнении с микроконтроллером.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическое описание, схема управления синхронного двигателя с постоянными магнитами, программируемая логическая интегральная схема, система автоматического проектирования, Altera Quartus II.

В связи с возникшей тенденцией к снижению стоимости цифровой техники представляется возможным и экономически целесообразным создание мощных систем управления приводами на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или микроконтроллера. ПЛИС может иметь индивидуальные характеристики, обладая рядом преимуществ: быстродействие, малое электропотребление, относительно низкая стоимость, высокий уровень интеграции. Общими же недостатками микроконтроллеров в регулировании привода являются ограниченные возможности производительности: обычно микроконтроллеры имеют фиксированную память, узкий диапазон аналоговых сигналов, фиксированный канал широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Недостаток ресурсов проявляется при реализации сложных алгоритмов обработки информации с высокими требованиями к производительности, при контроле нагрузки, коррекции положения, скорости и других параметров электроприводов. Так же, если имеется необходимость в нескольких электродвигателях, то необходимо

включение дополнительных микроконтроллеров, что повысит стоимость системы. Хотя при управлении электродвигателями микропроцессоры имеют достаточную производительность, они не могут полностью обеспечить работу системы управления в случае выполнения проблемно-ориентированных операций в реальном масштабе времени. При использовании ПЛИС повышается эффективность функционирования электроприводов в системах управления, позволяя легче масштабировать производительность. Очередным преимуществом ПЛИС перед микроконтроллерами является наличие у него большего количества аналоговых блоков и подсистем, что даёт возможность управлять несколькими электродвигателями [1]. Далее рассмотрим структуру привода с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) и его математическую модель управления для её дальнейшей реализации на ПЛИС.

Для начала определим структуру схемы управления для СДПМ, показанной на рис. 1. Она состоит из двух контуров управления: внутренний контур тока и внешний контур управления скоростью. Задатчик скорости (ω_m^*) сравнивается с фактической скоростью привода – (ω_m), а ошибка скорости – обрабатывается через контроллер скорости [2,3,4].

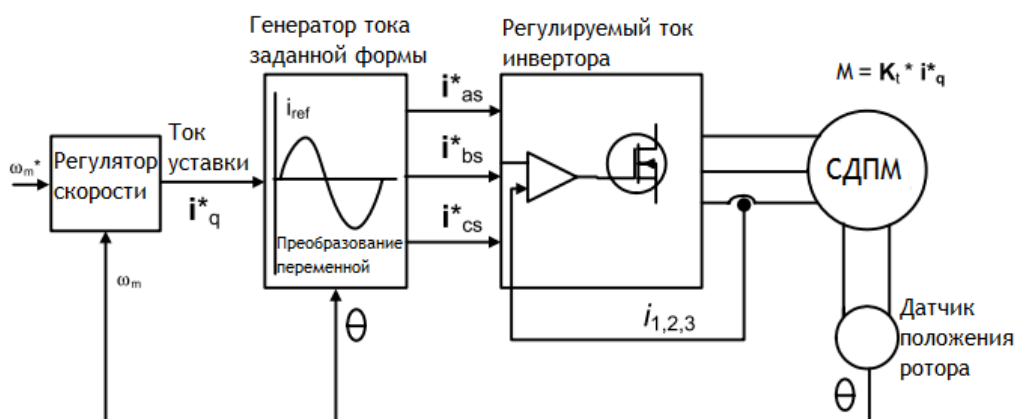


Рис. 1. Структурная схема управления СДПМ

В k -й момент выборки ошибка скорости двигателя контроллера определяется по формуле:

$$\omega_{error}(k) = \omega_m^*(k) - \omega_m(k) \quad (1)$$

и изменение ошибки скорости определяется по формуле:

$$\Delta\omega_{error}(k) = \omega_{error}(k) - \omega_{error}(k-1) \quad (2)$$

Сигнал регулирования тока по оси q относительно сигнала на изменение крутящего момента будет:

$$i_q^*(k+1) = \frac{T_e^*(k+1)}{K_t} \quad (3)$$

Ограничитель амплитуды применяется для насыщения выходного сигнала контроллера при максимальном значении тока инвертора [5]. Выход ограничителя записывается как:

$$i_q^*(k+1) = \begin{cases} i_{q,max}^* & \text{for } i_q^*(k+1) \geq i_{q,max}^* \\ -i_{q,max}^* & \text{for } i_q^*(k+1) \leq -i_{q,max}^* \end{cases} \quad (4)$$

Выход регулятора скорости представляет собой сигналы изменения крутящего момента для привода – T_e^* . Крутящий момент привода прямо пропорционален току оси q . Разделив сигнал крутящего момента на постоянную составляющую, получается сигнал регулирования тока по оси q . Масштабирование составляющей тока крутящего момента специфично для двигателя, и получается путем деления сигнала регулирования крутящего момента при помощи постоянной составляющей крутящего момента СДПМ – K_t . Положение ротора и скорость измерены с помощью датчика, соединенного с валом двигателя. Блок измерения скорости/положения генерирует электрическое угловое положение вала (θ_e), который используется для получения уставки тока осей a , b , c . Электрический угол (θ_e) равен механическому углу (θ_m), умноженному на пары полюсов двигателя. Токовая составляющая d -оси, которая определяет составляющую тока размагничивания СДПМ, сохраняется на нуле [6]. Уставка значения тока

q -оси и угла положения ротора используются для расчета трехфазных уставок токов (i_{as}^*), (i_{bs}^*) и (i_{cs}^*), как показано в уравнении ниже:

$$\begin{aligned}
 i_{as}^* &= i_q^* \sin 40_m \\
 i_{bs}^* &= i_q^* \left(\sin 40_m - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 i_{cs}^* &= i_q^* \left(\sin 40_m - \frac{4\pi}{3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

В этом контексте предполагается, что двигатель СДПМ имеет четыре полюса. Модуль контроллера тока сравнивает уставки трехфазных токов с их фактическими значениями и генерирует сигналы переключения для силовых ключей инвертора [7]. Математическая модель схемы управления СДПМ для реализации на ПЛИС показана на рис. 2 и рис. 3. Функциональная схема генератора тока показана на рис. 3.

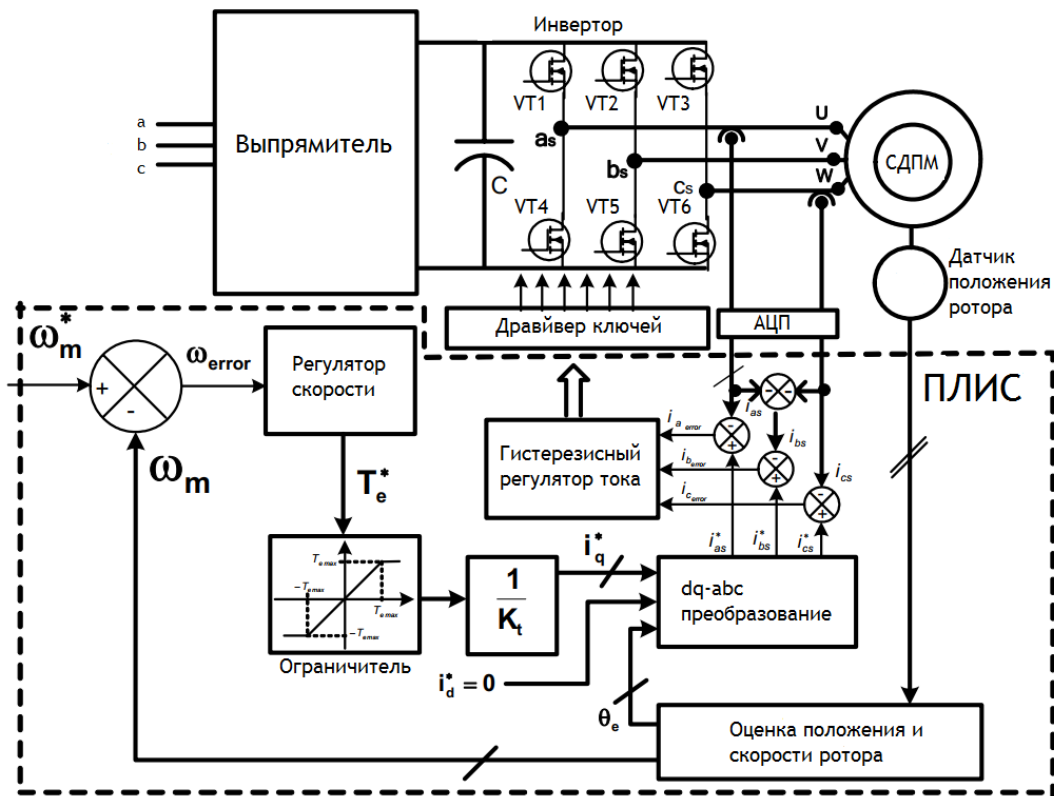


Рис. 2. Математическая модель управления для СДПМ

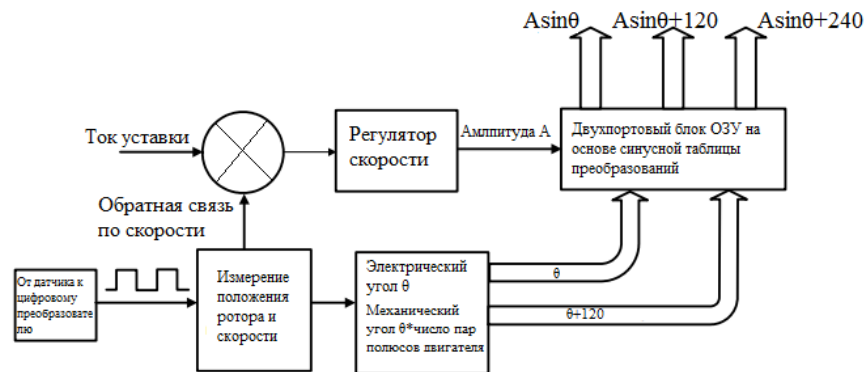


Рис. 3. Функциональная схема гистерезисного генератора тока уставки

Фактические токи статора (i_{as}) и (i_{cs}) измеряются с использованием двух датчиков тока, а третий ток (i_{bs}) рассчитывается как отрицательная сумма двух измеренных токов. Фактические токи сравниваются с токами уставки, а погрешности токов направляются к соответствующим гистерезисным регуляторам тока (рис. 4). Импульсы переключения, генерируемые погрешностями токов (i_{aerror}), (i_{berror}) и (i_{cerror}) управляют силовым ключам в инверторных плечах фазы (A), (B) и (C).

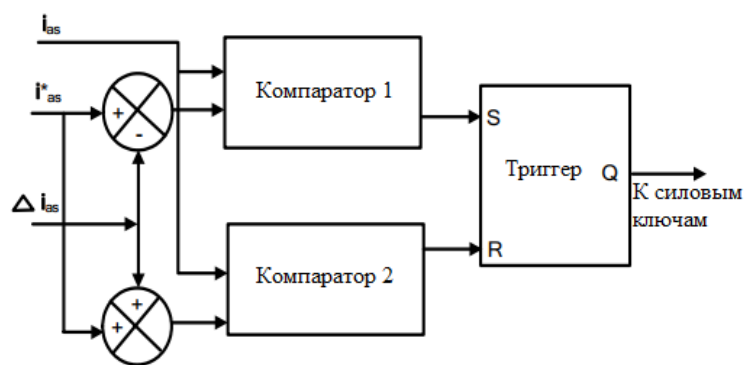


Рис. 4. Логическая схема для гистерезисного регулятора

Таким образом, в данной работе приведена математическая модель управления СДПМ: схема управления на базе ПЛИС с её внутренними

взаимосвязями цифровых элементов и датчиком обратной связи. В дальнейшем данная модель может быть принята за основу в аппаратной реализации системы управления СДПМ при помощи системы автоматического проектирования (САПР), например, в такой как Quartus II компании Altera [8, 9, 10, 11]. Так же рассмотрена целесообразность применения ПЛИС для реализации алгоритма управления СДПМ в сравнении с использованием микроконтроллера.

Литература

1. Вычужанин В.А. Методика проектирования оптимальных систем управления электродвигателями на ПЛИС // Современная электроника. 2011. № 7. С. 54-59.
2. Аракелян А. К., Афанасьев А. А. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов. М.: Высш. шк., 2006. 546 с.
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век, 2006. 336 с.
4. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр "Академия", 2006. 304 с.
5. Балковой А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 328 с.
6. Анучин А.С. Системы управления элеткроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
7. Тельпухов Д. В., Рухлов В. С., Иванова Г.А., Рыжова Д.И., Надоленко В.В., Деменева А.И. Исследование вариантов частичного резервирования при проектировании сбоеустойчивых логических блоков ПЛИС // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4681

8. Наваби З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС. М.: ДМК Пресс, 2016. 464 с.
9. Zeidman B. Verilog Designer's Library. Prentice Hall, 1999. 432 p.
10. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. СПб.: БХВПетербург, 2004. 528 с.
11. Боргоякова Т.Г., Лоцицкая Е.В. Системный анализ и математическое моделирование // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763

References

1. Vychuzhanin V.A. Sovremennaya elektronika. 2011. № 7. pp. 54-59.
 2. Arakelyan A. K., Afanas'yev A. A. Ventil'nyye elektricheskiye mashiny v sistemakh reguliruyemykh elektroprivodov [Valve electric machines in regulated drive systems]. M.: Vyssh. shk., 2006. 546 p.
 3. Ovchinnikov I.E. Ventil'nyye elektricheskiye dvigateli i privod na ikh osnove [Valve electric motors and their drive]. SPb.: KORONA-Vek, 2006. 336 p.
 4. Terekhov V.M., Osipov O.I. Sistemy upravleniya elektroprivodov [Electric drive control systems]. M.: Izdatel'skiy tsentr Akademiya, 2006. 304 p.
 5. Balkovoy A.P. Pretsizionnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision electric motor with valve motors]. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 328 p.
 6. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya eletkroprivodov [Electric drive control systems]. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.
 7. Tel'pukhov D. V., Rukhlov V. S., Ivanova G.A., Ryzhova D.I., Nadolenko V.V., Demeneva A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4681
-



8. Navabi Z. Proyektirovaniye vstraivayemykh sistem na PLIS [Digital Design and Implementation with Field Programmable Devices]. M.: DMK Press, 2016. 464 p.
9. Zeidman B. Verilog Designer's Library. Prentice Hall, 1999. 432 p.
10. Ugryumov E.P. Tsifrovaya skhemotekhnika [Digital electronics]. SPb.: BKHVPeterburg, 2004. 528 p.
11. Borgoyakova T.G., Lozitskaya E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763