В то же время затраты характеристической скорости для выведения КА с геопереходной орбиты на ГСО разгонным блоком «Бриз-М» (РН «Протон», космодром Байконур) составляют 3.93 км/с, а для выведения КА на ПО с апогеями 71000 км и 120000 км и изменения наклонения ПО с 51.5° до 0° на ПО −3.56 км/с и 3.44 км/с соответственно. Для ПО с апогеем 36000 км и наклонением 0˚ – 4.17 км/с.

Массы выводимые на данные ПО РН «Протон» с космодрома Байконур:

- примерно 5600 кг на 200 км × 36000 км, i=0˚;
- примерно 6800 кг на 200 км × 71000 км, i=0˚;
- примерно 7500 кг на 200 км × 120000 км, i=0˚;

Данные результаты доказывают возможность применения рассмотренных переходных орбит, и выбор той или иной переходной орбиты для довыведения зависит от соотношения между стоимостью килограмма ксенона и среднесуточной прибылью, получаемой заказчиком КА от эксплуатации спутника на целевой орбите. Уменьшение затрат ксенона связано с увеличением времени достижения КА ГСО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внуков А.А., Рвачёва Е.И. Предпосылки и перспективы создания полностью электрореактивных космических аппаратов для работы на геостационарной орбите // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 140-146.

2. Булынин Ю.Л., Попов В.В., Яковлев А.В. Результаты баллистического обеспечения запуска на геостационарную орбиту спутника «Эксперсс-АМ5» // 19-ая международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: тез. докл. М.: Изд-во МАИ, 2014.

3. Мирер С.А. Механика космического полета. Орбитальное движение: учеб. Пособие для студентов. ИПМ им. М.В. Келдыша.− 2013. Режим доступа: http://www.keldysh.ru/kur/move.pdf (дата обращения 10.06.2015).

4. Левантовский В.И., Механика космического полета в элементарном изложении, 3-е изд., дополненное и переработанное. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

5. Продукция ОКБ «Факел». Двигатель СПД−140. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.fakel-russia.com (дата обращения 20.07.2015).

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ПИД – РЕГУЛЯТОРА НА 8-РАЗРЯДНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ ATMEL AVR

Буй Дык Бьен
Научный руководитель: Мартемьянов В.М., доцент, к.т.н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: bientomsk@mail.ru

IMPLEMENTATION OF DISCRETE PID CONTROLLER USING ATMEL AVR 8-BIT MICROCONTROLLER

Scientific Supervisor: Associate Professor, Ph.D., Martemyanov V.M.
Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: bientomsk@mail.ru

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) широко распространены в различных приложениях, где важны широкий диапазон изменения угловой скорости, отсутствие узлов, которые требуются частое обслуживание, высокая долговечность и надежность. Управление данными двигателями и регулирование их скоростей вращения являются важнейшей научной и инженерной задачей,

решения которой можно достичь при помощи микроконтроллера. На практике оказывается, что при проектировании различных устройств автоматики неоднократно сталкивается задача обеспечения заданной угловой скорости вала двигателя, которая не зависит от действующей нагрузки. В работе представлены теоретический подход и результаты применения дискретного ПИД – регулятора для регулирования угловой скорости бесконтактного двигателя постоянного тока с применением 8-разрядными микроконтроллерами Atmel AVR. На основе полученных данных построены графические зависимости.

Brushless direct current (BLDC) motors are widely distributed in a variety of applications where a wide range of changes in angular velocity is important, the absence of nodes that requires frequent maintenance, is high durability and reliability. BLDC motor control and regulation of their speeds are essential scientific and engineering tasks which can be accomplished by using a microcontroller. In practice the fact is that the task of providing a predetermined angular velocity of the motor shafts, which is independent of the actual load, repeatedly meets in the design of various control devices. The article presents the theoretical approach and the results of application of discrete PID – controller for regulation the rotation speed of brushless direct current motor using Atmel AVR 8-bit microcontroller. Characteristic curves are built on basic of the received data.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к степени автоматизации технологических и подобных процессов, по этой причине проявляется тенденция на повышение использования микроконтроллеров.

AVR - это 8–разрядный RISC микроконтроллер, который имеет Гарвардский процессор, порты вывода/ввода, память данных, память программ и различные схемы интерфейсов [1]. Одним из наиболее распространенных законов автоматического регулирования является пропорциональный, с воздействием по интегралу и первой производной – ПИД. Эта популярность объясняется в простоте построения, невысокой стоимости, понятность функционирования и приспособленность для решения множества практических задач.

В общем случае ПИД – регулятор выражается следующей формулой [2]:

$$u(t) = K_P \varepsilon(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t)\,dt + K_P T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \qquad (1)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие, $\varepsilon(t)$ – отклонение, K_P – коэффициент пропорциональности, T_i – постоянная интегрирования, T_d – постоянная дифференцирования.

Для технического воплощения, в связи с тем, что микроконтроллер, являющий основой регулятора, оперирует с цифровыми сигналами, уравнение (1) необходимо представлять в дискретном виде, при этом применяются замены интегралов и производных их дискретными аналогами.

Из-за короткого интервала времени определения значения отклонения, дифференциальная составляющая ПИД – регулятора можно представить в виде [3]:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \approx \frac{\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1)}{T} \quad \text{при} \quad t = nT,$$

где n – дискретный шаг времени t.

При определении интегральной составляющей применяется приблизительное вычисление интеграла по формуле прямоугольников. У каждого прямоугольника есть ширина, равная интервалу времени определения значения отклонения и высота – значение ошибки, т. е. [3]:

$$\int_0^t \varepsilon(t)\,dt \approx T \cdot \sum_{k=0}^{n} \varepsilon(k)$$

В общем случае дискретный ПИД – регулятор имеет вид [3]:

$$u(n) = K_P \varepsilon(n) + K_i \cdot T \cdot \sum_{k=0}^{n} \varepsilon(k) + K_d \frac{[\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1)]}{T} \quad \text{при} \quad K_i = \frac{K_P}{T_i} \quad K_d = K_P T_d$$

По формуле, приведенной выше, была разработана программная реализация системы управления БДПТ (рис. 1), предназначенная для использования в контроллерах AVR [4].

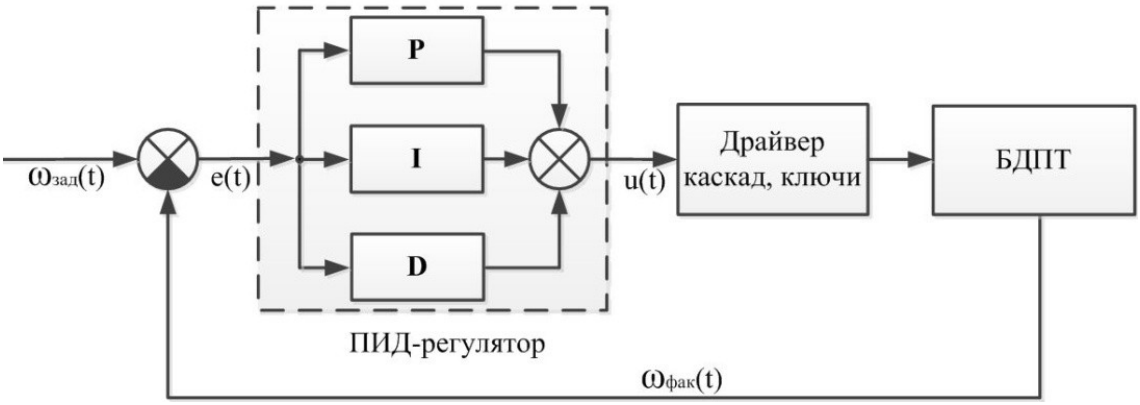

Рис. 1. Структурная схема системы управления БДПТ с ПИД– регулятором

Для проверки работоспособности программы регулирования скорости вращения БДПТ использовался микроконтроллер Atmega16L. В качестве среды разработки программного обеспечения для данного микроконтроллеров использован Codevision AVR 2.50.

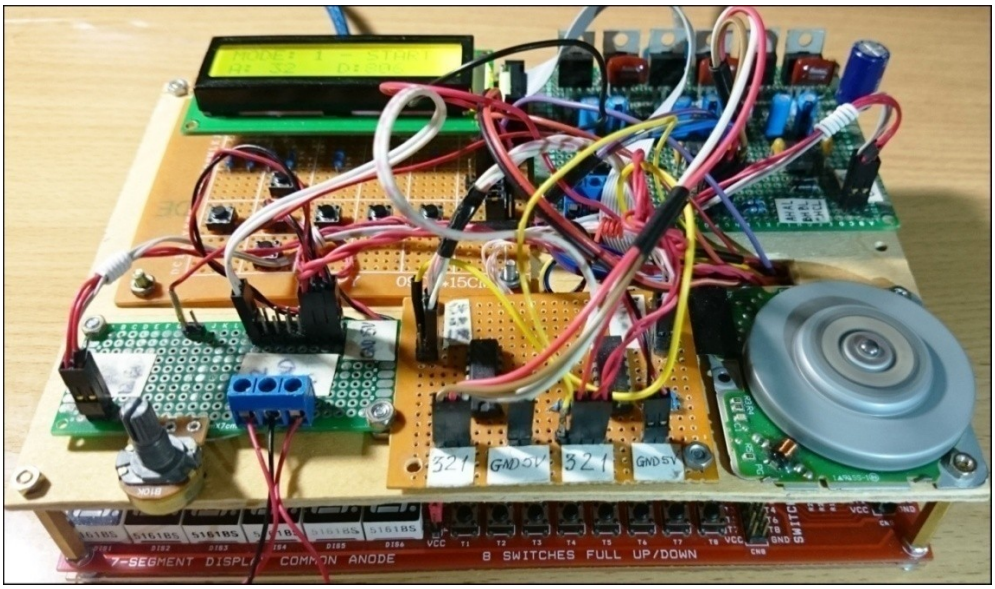

Рис. 2. Макет системы управления БДПТ

В реализованной схеме (рис. 2), сигнал обратной связи формулируется датчиком Холла и имеет частоту 10 импульсов в одном обороте. Количество импульсов определяется при использовании функции внешнего прерывания микроконтроллера Atmega16L. Требуемая скорость задается с помощью коммутаторов. Отклонение угловой скорости определяется через каждый 25 мс, выходная величина регулятора является скважностью ШИМ сигнала, которая генерируется таймером «1».

Экспериментальные исследования проведены на изготовленном макете при различных коэффициентах ПИД – регулятора, подобранных ручной настройкой и результаты были представлены на рисунке 3.

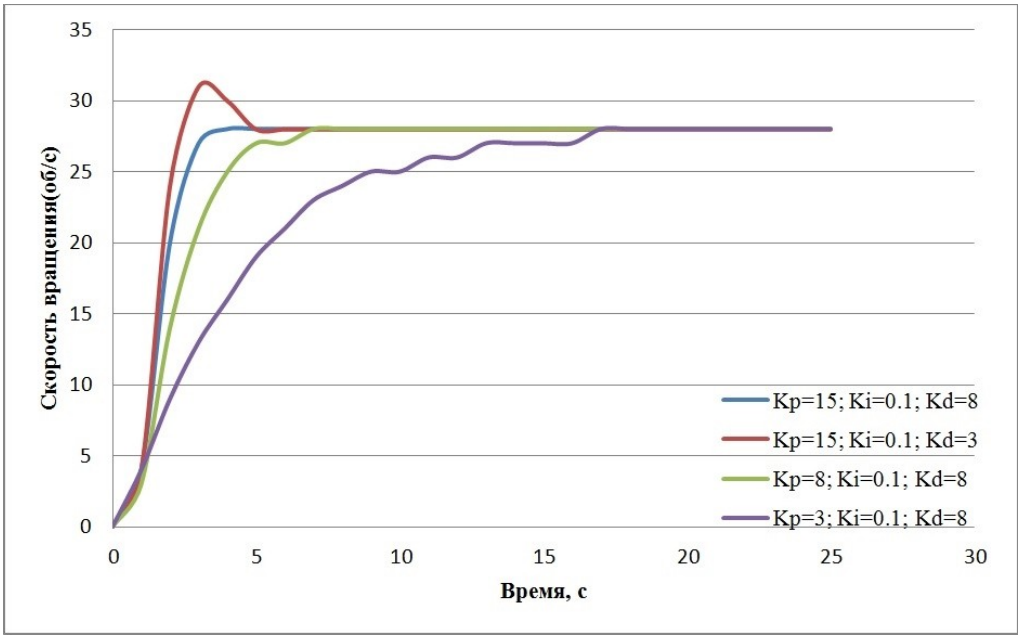

Рис. 3. Режим разгона БДПТ при различных коэффициентах ПИД – регулятора

На основе полученных результатов, можно прийти к выводу, что дискретный ПИД – регулятор эффективно реализован на базе 8-разрядных микроконтроллеров AVR и дает возможность обеспечения заданной скорости вращения вала бесконтактного двигателя постоянного тока. Кроме того, использование дискретного ПИД – регулятора позволяет выбирать характер переходного процесса угловой скорости при включении двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев К.Б., Палагута К.А. Микроконтроллерное управление электроприводом: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008. – 298с.

2. Дядик В.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие/ В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Криницын; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. − Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

3. AVR221: Discrete PID controller. Application Note. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.atmel.com/images/doc2558.pdf.

4. 8-bit AVR microcontroller with 16k bytes in-system programmable flash Atmega16/Atmega16L. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf.