УДК 681.587.7

**УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В РАЗОМКНУТОМ РЕЖИМЕ**

*А.А. Киселев\*, М.И. Надежин, В.И. Тимофеева, Ю.В. Жигулина, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, \*kis.lecha@yandex.ru*

**Введение и постановка проблемы**

Шаговые двигатели (ШД) уже давно используются в различных устройствах точного воспроизведения заданных параметров движения [1]. И не удивительно, ведь электроприводы на базе ШД позволяют получить большие моменты при низких скоростях вращения, обладают высокой точностью позиционирования, надёжны и при этом не требуют датчиков обратных связей [2].

На сегодняшний день самым популярным способом управления ШД является полушаговый режим. Однако, данный метод имеет существенные недостатки. Так, например, при низкой скорости вращения он вызывает сильные вибрации и шум. Поэтому нами было принято решение разработать новый алгоритм управления, который удовлетворял бы следующим требованиям:

1. Возможность изменения скорости в широком диапазоне.
2. Разгон и торможение с заданными ускорениями.
3. Отработка заданного положения с точностью до шага.
4. Постоянный ток потребления во время движения.
5. Низкие вибрации.
6. Отсутствие датчиков угла и тока.

**Описание аппаратной части**

В ходе работ по разработке устройства высокоточного позиционирования навигационных объектов – гексапода (совместная НИОКТР БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и ОА «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва) была разработана плата драйвера ШД макета блока управления гексапода. В основе данной платы лежит микроконтроллер STM32F407VET6, а ШД управляются с помощью двухмостовых драйверов управления электродвигателями L298P. На этой плате и происходила отладка разрабатываемого алгоритма.

Подключение ШД к драйверу L298P приведено на рисунке 1. Данная микросхема имеет четыре силовых выхода OUT1 – OUT4, управляемых с помощью входов IN1 – IN4. При подаче высокого уровня на вход, соответствующий ему выход присоединяется к напряжению питания ШД VS. При подаче низкого уровня – к земле. Таким образом, мы можем контролировать оба конца каждой обмотки, то есть регулировать направления токов в них, а используя широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) ещё и их величину. Вход ENA предназначены для включения выходов OUT1 и OUT2, ENB – входов OUT3 и OUT4.

В ходе работ использовался биполярный ШД FL28STH32, характеристики которого представлены в таблице 1.

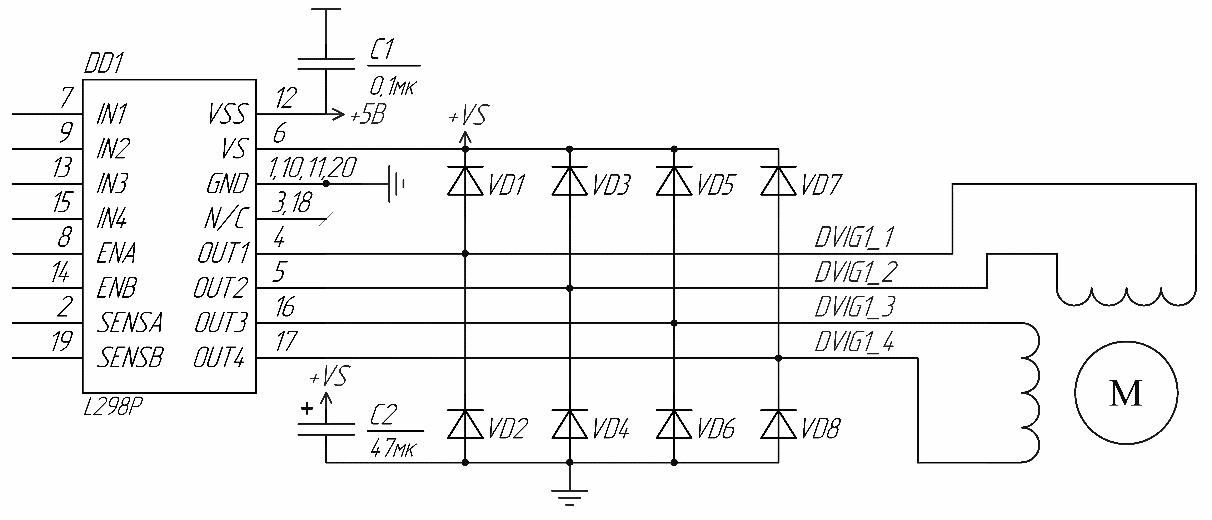


Рисунок 1 – подключение ШД к драйверу L298P

Таблица 1 – характеристики ШД FL28STH32

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристика | Единица измерения | Значение |
| Ток/фаза | А | 0,67 |
| Сопротивление/фаза | Ом | 5,6 |
| Индуктивность/фаза | мГн | 3,8 |
| Крутящий момент | г\*см | 600 |

**Составление математической модели**

Математическая модель составлялась в виде структурно-динамических схем в пакете математического моделирования Matlab Simulink с использованием библиотек Simscape Power System. Данную модель можно разделить на несколько частей:

* Модель шагового двигателя (реализовано посредством блока Stepper Motor).
* Модель драйвера (реализовано с помощью блоков Mosfet)
* Модель системы управления.

Фрагмент модели двигателя и драйвера приведён на рисунке 2. Благодаря блокам NOT происходит моделирование метода управления драйвера L298P (возможность подключить выход либо к земле, либо к питанию). Функционально данная модель полностью соответствует приведённой выше электрической схеме (рисунок 1). Управление полумостами осуществляется подачей сигналов на генераторы ШИМ (англ. PWM).



Рисунок 2 – модель ШД с драйвером

**Описание алгоритма движения**

Для обеспечения возможности регулирования скорости в широком диапазоне с сохранением низкого уровня вибрации было принято решение использовать синусоидальные токи в обмотках двигателя. Однако, популярный метод микрошагового режима всё равно не гарантирует плавности движения (и как следствие отсутствия вибраций) при низкой скорости вращения. Поэтому нами было принято решение, в отличие от традиционных методов, которые по сути осуществляют квантование сигналов по уровню, разработать подход, в основе которого будет лежать квантование сигналов по времени.

В каждый период квантования будет происходить вычисление требуемых токов в обмотках ШД, как функций синуса и косинуса. Воспроизведение данных токов будет происходить следующим образом: в зависимости от направления (знака) тока один конец обмотки подключается к земле, а на втором с помощью ШИМ формируется необходимое напряжение. При этом мы вводим допущение, что ток в обмотках двигателя пропорционален коэффициенту заполнения ШИМ.

Входными данными для алгоритма являются:

* *Ω*0 – требуемая скорость вращения двигателя, об/мин;
* *Aр* – ускорение при разгоне, об/мин/с;
* *Aт* – модуль ускорения при торможении, об/мин/с;
* *S* – расстояние в шагах.

В первую очередь необходимо перевести данные величины (которые привязаны к вращению ШД) в величины, привязанные к вращению электромагнитного поля:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

где *Q* – количество шагов в одном обороте ШД.

Затем необходимо определить достижение заданной скорости за отведённое количество шагов. Всего возможно два варианта, представленные на рисунке 3. На данных рисунках: *s*1, *s*2, *s*3 – количество шагов во время разгона, движения с постоянной скоростью и торможения соответственно; *t*1, *t*2, *tи*, *tк* – время окончания разгона, начало торможения (либо и того, и того) и окончания движения; *ωф* – фактически развитая скорость.

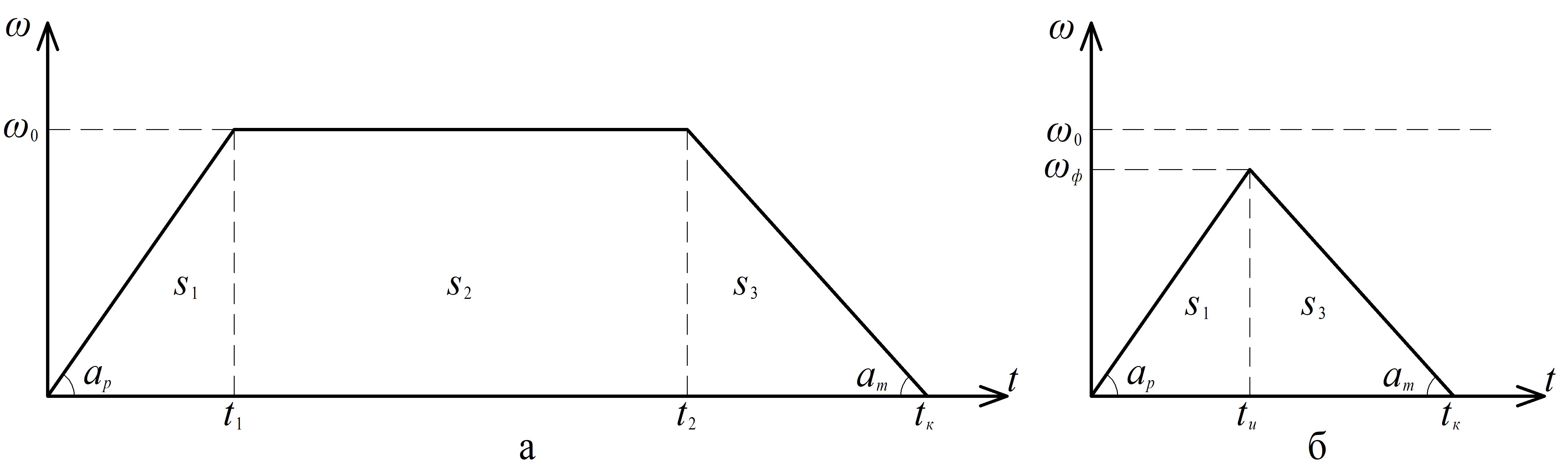


Рисунок 3 – графики скорости при заданных параметрах: а – с достижением заданной скорости, б – без достижения заданной скорости

По входным данным можно однозначно определить принадлежность к одному из видов движения (а или б). Для этого необходимо рассчитать расстояние *s*2 по следующей формуле:



Если *s*2 > 0, то заданная скорость *ω*0 достигается (вариант а, рис. 3а), в противном случае торможение начинается раньше (вариант б, рис. 3б).

Для переключения режимов (разгон, движение, торможение, простой) принято решение ориентироваться по времени. Для определения моментов времени *t*1, *t*2, *tи*, *tк* для конкретного случая необходимо воспользоваться следующими формулами:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| а) | ; ; |  |
| б) | ; |  |

Скорость вращения ШД зависит от частоты вращения электромагнитного поля, которая, в свою очередь, зависит от частоты синусоид токов в обмотках двигателя. Было установлено, что, если *x*(*t*) – дифференцируемая на рассматриваемом промежутке функция времени, то мгновенная частота синусоиды *y* = sin(*x*(t)) равняется производной данной функции *dx*(*t*)/*dt*. Верно и обратное, то есть, задавшись необходимой частотой (или законом её изменения) и проинтегрировав ее, можно получить функцию *x*(*t*), синусоида от которой будет иметь заданную частоту.

**Разгон**

Для обеспечения плавного разгона необходимо обеспечить линейное возрастание частоты от 0. Тогда требуемая функция будет иметь вид:



где *ω* – частота тока, *x*(*t*) – аргумент функций синуса и косинуса, *x*0 – начальное смещение по фазе.

Начальное смещение по фазе является постоянной интегрирования. В данном случае её значение можно выбирать, исходя из текущего положения двигателя, или, как в нашем случае, принять равным нулю.

**Движение с постоянной скоростью**

В данном случае частота является константой, поэтому формула значительно упрощается:



Однако, в данном случае уже нельзя пренебрегать смещением *x*1, иначе при переходе от разгона к движению с постоянной скоростью фазы синусоид не будут совпадать, и будет резкий скачок тока. Данное смещение можно высчитать по формуле:



**Торможение**

Данный режим является самым сложным. Для удобства в момент начала торможения заново начнём отсчёт времени. Задавшись линейно убывающей от *ω*∗ частотой, получаем:



где для различных вариантов:

|  |  |
| --- | --- |
| а) | ; ; |
| б) | ; ; |

**Итоговая функция**

Объединяя всё вышесказанное, можно составить зависимость значений ШИМ (*u*1 и *u*2) в обмотках двигателя для двух вариантов. Ниже приведен пример формул для одной обмотки. Для второй обмотки они будут аналогичны, только с косинусом. К слову, при замене синусов и косинусов местами, меняется направление вращения двигателя.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| а) |  |  |
| б) |  |  |

где *A* – амплитуда сигнала (максимальное значение ШИМ).

**Ограничение тока**

С ростом частоты вращения снижается потребляемый электродвигателем ток. Для предотвращения потери момента при высоких скоростях и критических значений токов при малых необходимо применять регулирование потребляемого тока. При отсутствии датчиков тока это можно реализовать следующими действиями:

1. Заранее задаться величиной потребляемого двигателем тока *Iз*
2. Запустить двигатель на вращение с постоянной скоростью *ω*
3. Регулированием амплитуды ШИМ *A* добиться потребление двигателем тока *Iз*
4. Повторяя пункты 2-3 снять зависимость *A*(*ω*) при *Iз*
5. Полиномом аппроксимировать данную зависимость (нам хватило второй степени)

Стоит учитывать, что *ω* является производной от аргумента синусоид *x*(*t*).

**Составление модели управления**

В MatLab Simulink была составлена подсистема формирования сигналов для обмоток ШД, представленная на рисунке 4. Для данной подсистемы была создана маска, в которой пользователь задаёт входные данные (*Ω*0, *Aр*, *Aт*, *S*). Помимо этого, в ней производится инициализация требуемых параметров (*ω*0, *aр*, *aт*, *s*, *t*1, *t*2, *tи*, *tк*, *ωф*, *x*1, *x*∗).

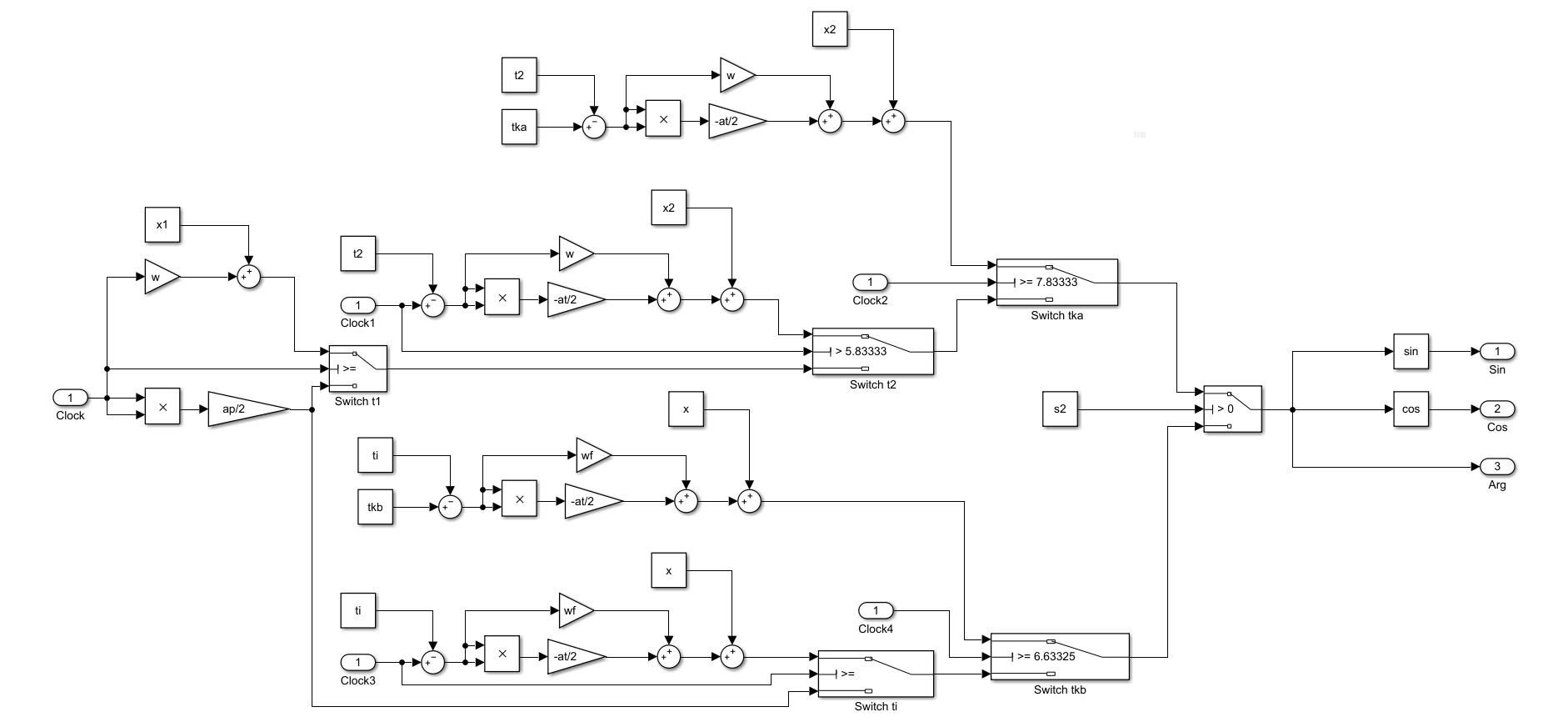


Рисунок 4 – подсистема формирования сигналов в обмотках ШД

Ограничение тока осуществляется за пределами данной подсистемы. Помимо входных данных, задаваемых в маске, необходимо на вход подсистемы подать сигнал с блока Clock. При этом между ним и подсистемой необходимо поставить квантователь по времени с экстраполятором нулевой степени (Zero-Order Hold).

На рисунке 5 приведён график примера формируемого сигнала, а на рисунке 6 представлены графики скорости и угла ШД, полученные на описанной выше модели при *Ω*0 = 50 об/мин, *Aр* = 10 об/мин/с, *Aт* = 5 об/мин/с, *S* = 2000 шагов.

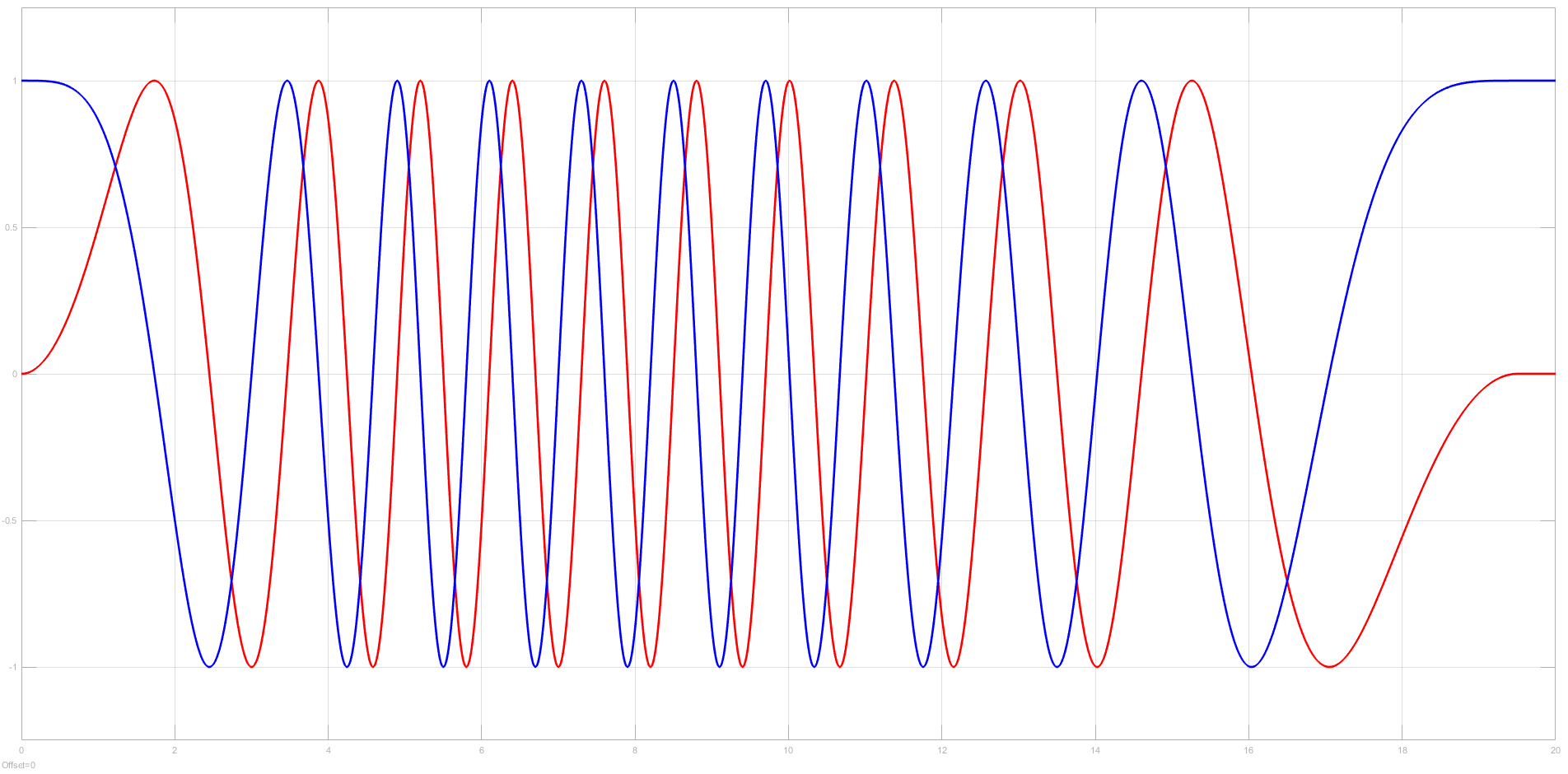


Рисунок 5 – пример формируемых сигналов

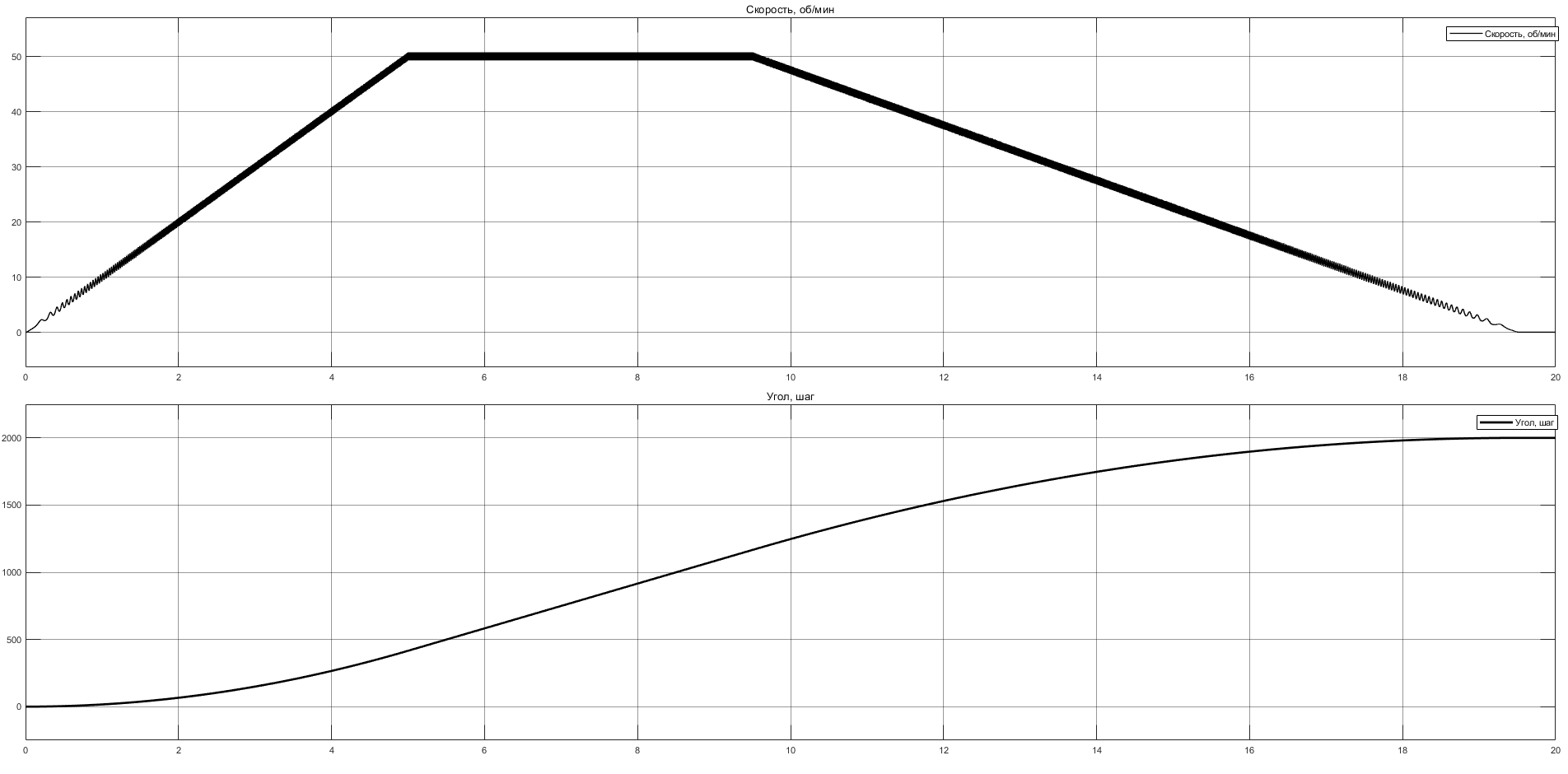


Рисунок 6 – графики скорости (сверху) и угла (снизу) ШД

**Выводы и перспективы развития**

Разработанный алгоритм был воссоздан на модели в Matlab Simulink. После отладки он был реализован в микроконтроллере STM32 (на описанной в этой статье плате) и показал свою высокую эффективность. Данный метод позволяет осуществить разомкнутое управление ШД с регулированием скорости и ускорений. При его использовании понижаются вибрации и увеличивается плавность движения, пропадает ярко выраженная дискретность. Помимо этого, метод позволяет поддерживать потребляемый ток на заданном значении.

Однако, описываемый метод имеет крайне существенный недостаток – большую вычислительную сложность. К примеру, используемый нами микроконтроллер совместно с операционной системой реального времени FreeRTOS не смог обеспечить частоту дискретизации в 1000 Гц. Данная операционная система потребляет весьма много ресурсов. Без нее микроконтроллер прекрасно справлялся и с 2000 Гц.

Таким образом, для развития этого метода в первую очередь необходимо улучшить быстродействие этого алгоритма. Если разрабатываемое устройство управляет одним ШД, то данный алгоритм уже можно применять. Если двумя – стоит уделить особое внимание оптимизации кода. Для большего числа ШД перспективным направлением развития данного метода будет передача вычислительных функций от микроконтроллера к программируемым логическим интегральным схемам (ПЛИС).

**Библиографический список:**

1. Paul Acarnley. Stepping motors. A guide to theory and practice. 4th еd. London: Institution of Engineering and Technology, 2007. 159 p.
2. Кенно Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200с.