

## УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ДВИГАТЕЛЯ BLDC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В MATLAB/SIMULINK



### BLDC ENGINE SPEED CONTROL USING A NEURAL NETWORK MODEL IN MATLAB/SIMULINK

#### До Чи Тхань

кафедра электротехники и электроники,  
Восточноазиатский технологический университет (EAUT),  
Ханой, Вьетнам  
thanhdc@eaut.edu.vn

#### Нгуен Тхи Лан

кафедра электротехники и машиностроения,  
FPT Polytechnic,  
Ханой, Вьетнам  
lannt91@fe.edu.vn

**Аннотация.** Основной целью этой статьи является управление скоростью бесщеточного двигателя постоянного тока с использованием контроллера искусственной нейронной сети (ИНС) и ПИД-регулятора. Детальный анализ был выполнен на основе результатов моделирования обоих методов. Система управления скоростью бесщеточного двигателя постоянного тока на основе нейронного управления разработана путем анализа математической модели бесщеточного двигателя постоянного тока. Распознавание заводской модели было выполнено в программном обеспечении MATLAB Simulink для распознавания блока ANN системы электропривода BLDC. Эталонная модель управления предназначена для получения идеальных значений параметров управления, когда система управления реагирует на командный сигнал. Результаты производительности ПИД-регулятора и контроллера ANN сравниваются с выходными данными эталонной модели системы привода двигателя BLDC в среде MATLAB Simulink. Сравнительное исследование показало, что метод управления скоростью на основе ИНС устраняет перерегулирование, сокращая время отклика системы. Замечено, что результаты моделирования, основанные на ИНС, ближе к отклику идеальной эталонной модели управления, чем результаты, основанные на ПИД.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети (ИНС), бесщеточные двигатели постоянного тока (BLDC), ПИД-контроллер, двигатель, смоделированный в MATLAB/Simulink.

#### Do Chi Thanh

Department of Electrical Engineering  
and Electronics, East Asia University  
of Technology (EAUT),  
Hanoi, Vietnam  
thanhdc@eaut.edu.vn

#### Nguyen Thi Lan

Department of Electrical Engineering  
and Mechanical Engineering,  
FPT Polytechnic,  
Hanoi, Vietnam  
lannt91@fe.edu.vn

**Annotation.** The main purpose of this article is to control the speed of a brushless DC motor using an artificial neural network controller (INS) and a PID regulator. A detailed analysis was performed based on the results of simulations of both methods. The system for controlling the speed of a brushless DC motor based on neural control is run once by analyzing a mathematical model of a brushless-accurate DC motor. Recognition of the Z-Vodskaya model was performed in the MATLAB Simulink software for recognizing the ANN block of the BLDC electric drive system. The reference control model is designed to obtain ideal values of the control parameters when the control system responds to a command signal. The performance results of the PID controller and the ANN controller are compared with the output of the reference model of the BLDC motor drive system in the MATLAB Simulink environment. A comparative study has shown that the ANN-based speed control method eliminates overshoot, reducing system response time. It has been observed that ANN-based simulation results are closer to the response of an ideal control reference model than PID-based ones.

**Keywords:** artificial neural networks (ANNs), brushless DC motors (BLDCs), PI controller, motor modeled in MATLAB/Simulink.

### 1. Введение

Бесщеточный электродвигатель постоянного тока, также известный как электродвигатель с электронной коммутацией, представляет собой синхронный двигатель, использующий источник электропитания постоянного тока. Он использует электронный контроллер для переключения постоянного тока на обмотки двигателя, создающие магнитные поля, которые эффективно вращаются в пространстве и за которыми следует ротор с постоянными магнитами. Контроллер регулирует фазу и амплитуду импульсов постоянного тока для управления скоростью и крутящим моментом двигателя. Эта система управления является альтернативой механическому коммутатору (щеткам), используемому во многих обычных электродвигателях. Конструкция системы бесщеточного двигателя обычно аналогична синхронному двигателю с постоянными магнитами (PMSM), но также может быть переключаемым реактивным двигателем или

асинхронным двигателем. Они могут также использовать магниты и быть бегущими (статор окружен ротором), внутренними бегунами (ротор окружен статором) или осевыми (ротор и статор плоские и параллельные) [1]. Преимущества бесщеточного двигателя по сравнению с щеточными двигателями заключаются в высоком соотношении мощности к весу, высокой скорости, почти мгновенном управлении скоростью (об/мин) и крутящим моментом, высокой эффективностью и низкими затратами на техническое обслуживание. Бесщеточные двигатели находят применение в таких областях, как компьютерная периферия (дисководы, принтеры), ручные электроинструменты и транспортные средства, от моделей самолетов до автомобилей. В современных стиральных машинах бесщеточные двигатели постоянного тока позволили заменить резиновые ремни и редукторы конструкцией с прямым приводом [2].

Коллекторные двигатели постоянного тока были изобретены в 19 веке и до сих пор широко распространены. Бесщеточные двигатели постоянного тока стали возможными благодаря развитию твердотельной электроники в 1960-х годах [3]. Электродвигатель развивает крутящий момент, сохраняя магнитные поля ротора (вращающаяся часть машины) и статора (неподвижная часть машины) несоосными. Один или оба набора магнитов представляют собой электромагниты, состоящие из катушки проволоки, намотанной на железный сердечник. Постоянный ток, проходящий через проволочную обмотку, создает магнитное поле, обеспечивающее мощность, которая приводит в действие двигатель. Несосоосность создает крутящий момент, который пытается выровнять поля. По мере того, как ротор движется и поля выравниваются, необходимо перемещать поле ротора или статора, чтобы поддерживать несоосность и продолжать генерировать крутящий момент и движение. Устройство, перемещающее поля в зависимости от положения ротора, называется коммутатором [4] [5] [6].

Бесщеточные двигатели широко используются в электромобилях, гибридных транспортных средствах, личном транспорте и электрических самолетах [7]. В большинстве электронных велосипедов используется бесщеточный двигатель, который иногда встроен в ступицу колеса, при этом статор надежно закреплен на валу, а магнит прикреплен к колесу и вращается вместе с ним. Тот же принцип применяется в самобалансирующихся колесах. В большинстве радиоуправляемых моделей с электрическим приводом используются бесщеточные двигатели из-за их высокой эффективности.

В настоящее время область управления электроэнергетической системой в целом и управлением двигателем в частности широко изучена. Новые технологии применяются к ним, чтобы спроектировать сложную технологическую систему. Одной из этих новых технологий являются искусственные нейронные сети (ИНС), которые основаны на принципе работы нервных нейронов человека. Существует ряд статей, в которых используются приложения ИНС для определения математической модели двигателя постоянного тока. И затем эта модель применяется для управления скоростью двигателя. Они также используют инвертирующую прямую ИНС с двумя входными параметрами для адаптивного управления двигателем постоянного тока [8].

## 2. Электронные контроллеры

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор является более широко используемой системой управления, чем пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Основная потребность контроллера заключается не только в управлении скоростью, но и в уменьшении разницы между фактической скоростью и заданной скоростью. Параметры ПИ-регулятора, в основном усиление, т.е. пропорциональное и интегральное усиление влияет на производительность всего контроллера. Таким образом, настройка параметров является очень важной и сложной работой. ПИ-регуляторы в основном используются для процессов, которые имеют дело с одним и тем же входом и возмущением и приводят к одному и тому же результату, т.е. нет интеграции. Взвешенный по времени интеграл абсолютной ошибки и методы управления внутренним режимом в основном используются для настройки ПИ-регулятора. Измеренные ток, напряжение и скорость передаются на контроллер.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1)$$

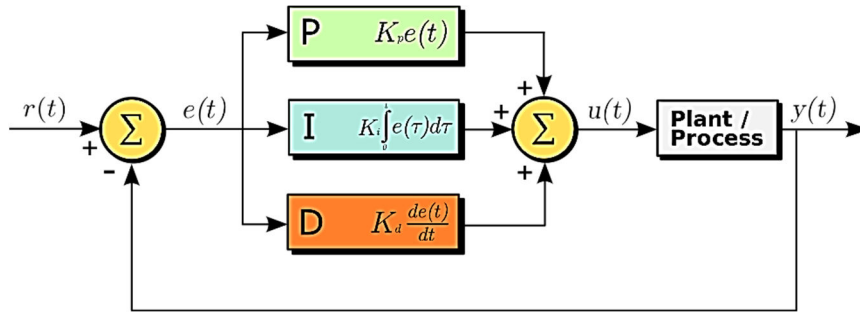


Рисунок 1 – Схема ПИД-регулятора

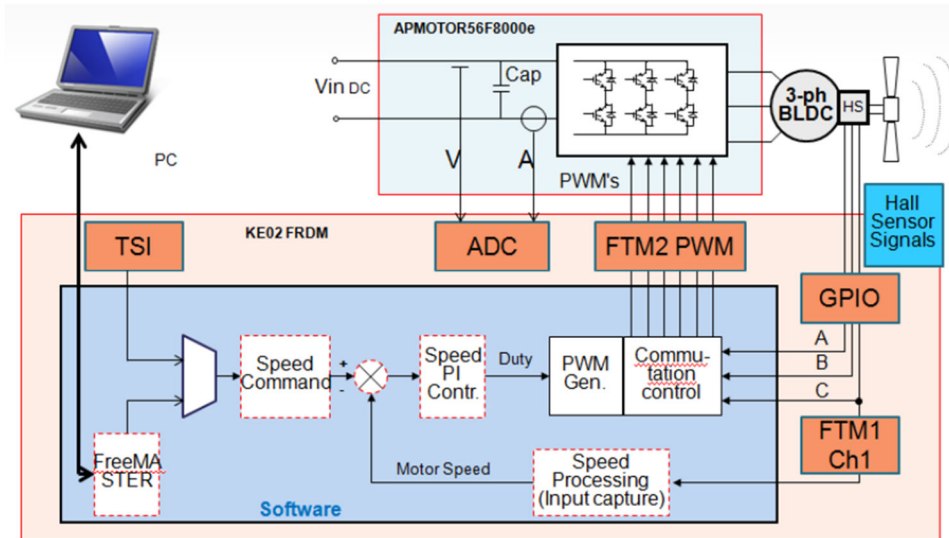


Рисунок 2 – Схема управления BLDC с замкнутым контуром



Рисунок 3 – Базовая блок-схема контроллера скорости двигателя BLDC

Работа ПИ-регулятора основана на приведенном выше уравнении. Сигнал ошибки рассчитывается в контроллере путем получения разности фактического и эталонного значений. В ПИ-регуляторе ошибка умножается на пропорциональность и интегральную константу. Полученное значение будет иметь экспоненциальный порядок, поэтому, чтобы сделать его сравнимым с другими величинами, оно передается на преобразователь сигналов ШИМ. Затем ПИ-регулятор управляет скоростью двигателя, изменяя постоянное напряжение, подаваемое на обмотку двигателя через мостовой преобразователь, как описано выше. Мостовой преобразователь – это преобразователь постоянного тока, который имеет более высокий КПД по сравнению с мостовым выпрямителем. Они позволяют повышать и понижать входы, как трансформатор, а также обеспечивают изоляцию.

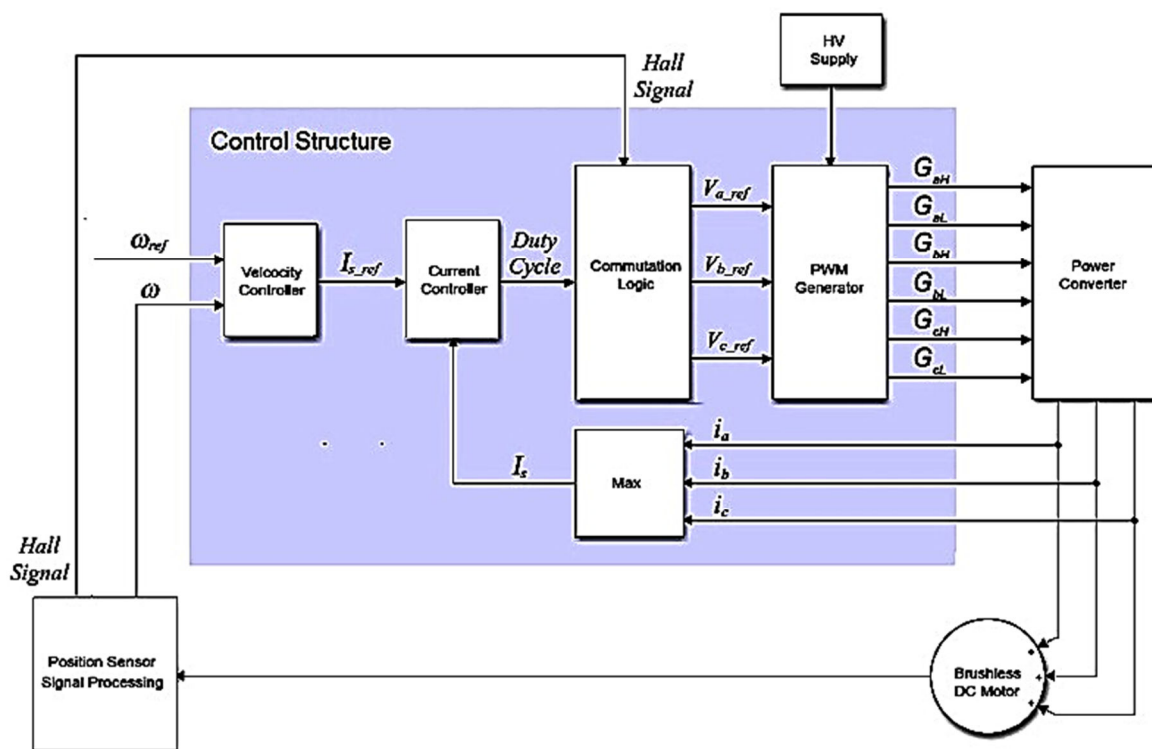


Рисунок 4 – Блок логики переключения BLDC реализует логику переключения для бесщеточного двигателя постоянного тока как часть этого алгоритма управления

Таблица 1 – Логика коммутации основана на сигналах Холла, как указано в этой таблице

| Датчики Холла |         |         | Фазы двигателя |        |        |
|---------------|---------|---------|----------------|--------|--------|
| Холла a       | Холла b | Холла c | Фаза a         | Фаза b | Фаза c |
| 0             | 0       | 0       | 0              | 0      | 0      |
| 1             | 1       | 0       | 0              | 1      | -1     |
| 0             | 1       | 0       | -1             | 1      | 0      |
| 0             | 1       | 1       | -1             | 0      | 1      |
| 0             | 0       | 1       | 0              | -1     | 1      |
| 1             | 0       | 1       | 1              | -1     | 0      |
| 1             | 0       | 0       | 1              | 0      | -1     |
| 1             | 1       | 1       | 0              | 0      | 0      |

### 3. Нейросетевой контроллер

В эталонной архитектуре управления нейронной модели используются две нейронные сети: сеть контроллера и сеть модели предприятия, как показано на следу-

ющем рисунке. Сначала идентифицируется модель объекта, а затем контроллер обучается так, чтобы выходные данные объекта соответствовали выходным данным эталонной модели.

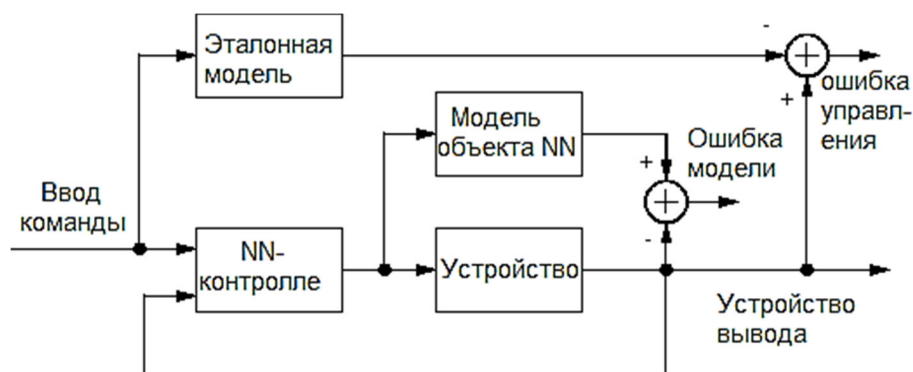


Рисунок 5 – Архитектура эталонного управления нейронной модели использует две нейронные сети

На следующем рисунке показаны детали модели объекта нейронной сети и контроллера нейронной сети, поскольку они реализованы в программном обеспечении Neural Network Toolbox™. Каждая сеть имеет два слоя, и вы можете выбрать количество нейронов для использования в скрытых слоях. Имеется три набора входов контроллера:

- Задержанные эталонные входы;
- Выходы контроллера с задержкой;
- Задержка выхода продукции завода.

Для каждого из этих входов вы можете выбрать количество значений с задержкой для использования. Как правило, количество задержек увеличивается с заказом завода. Есть два набора входных данных для модели объекта нейронной сети:

- Выходы контроллера с задержкой;
- Задержка выхода продукции завода.

Как и в случае с контроллером, вы можете установить количество задержек. В следующем разделе показано, как можно установить параметры.

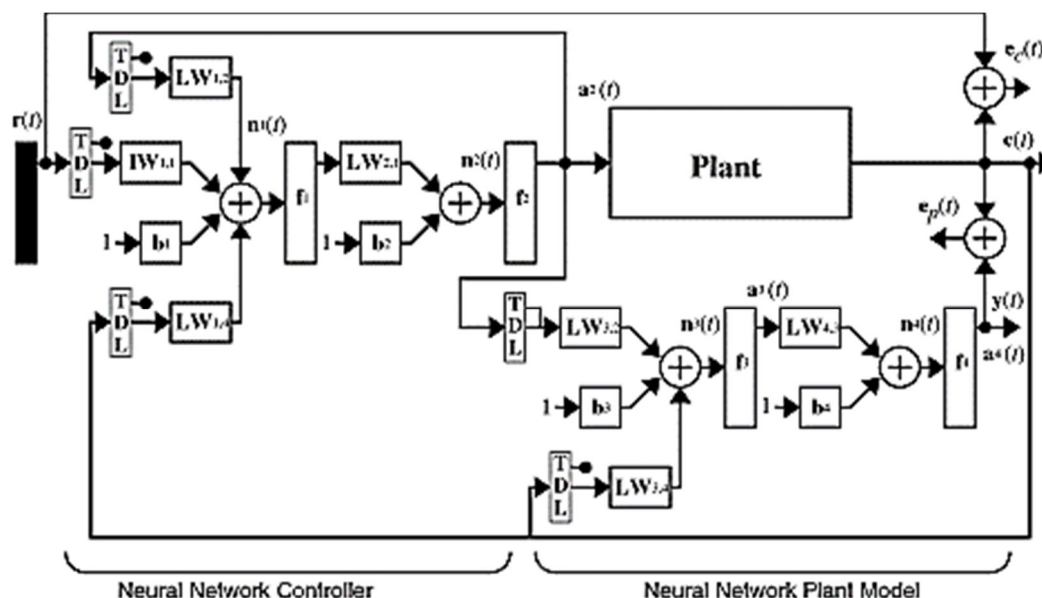


Рисунок 5 – Модель объекта нейронной сети и контроллер нейронной сети в том виде, в каком они реализованы в программном обеспечении нейронной сети

#### 4. Результаты моделирования BLDC двигателя

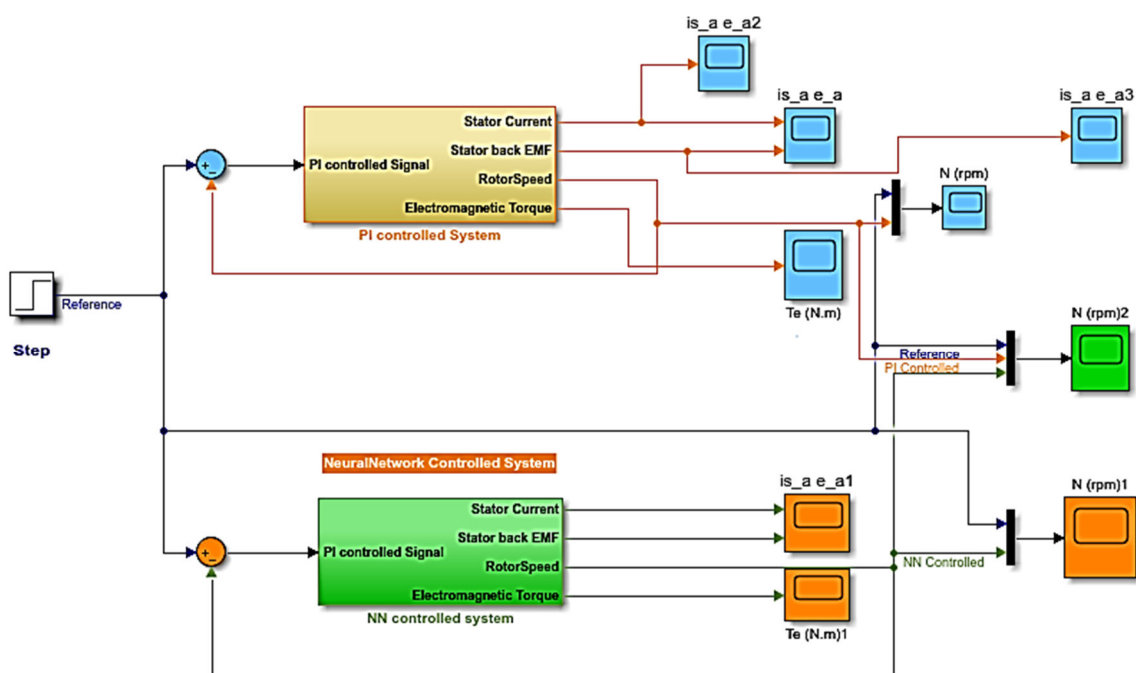


Рисунок 6 – Модель Mat Lab/Simulink для двигателя BLDC

Контроллер с использованием ПИ и нейронной сети

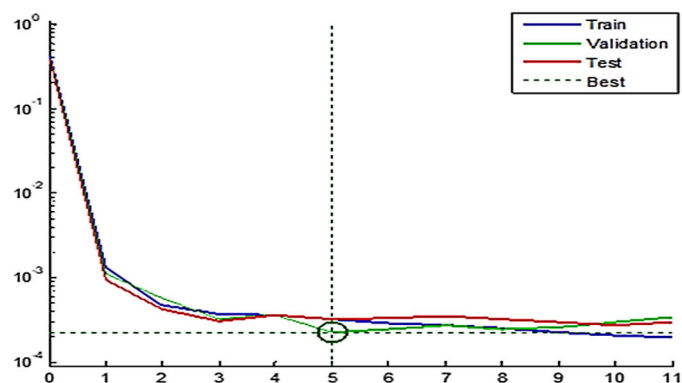


Рисунок 7 – Кривая производительности для проверки результатов

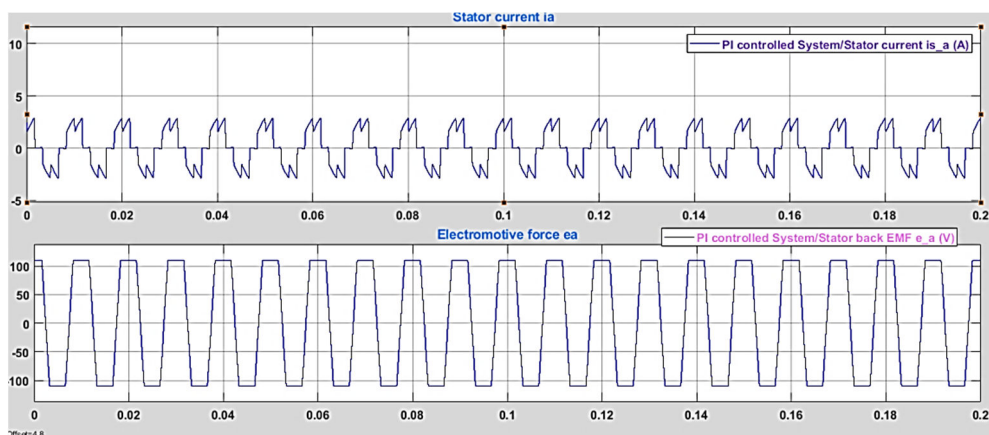


Рисунок 8 – Ток статора и противо-ЭДС фазы А с использованием контроллера ПИ

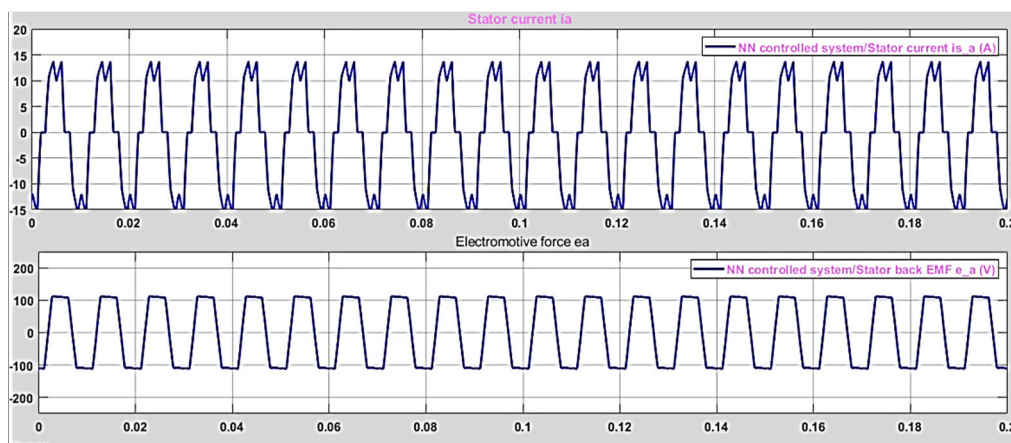


Рисунок 9 – Ток статора и противо-ЭДС фазы А с использованием нейронной сети контроллера

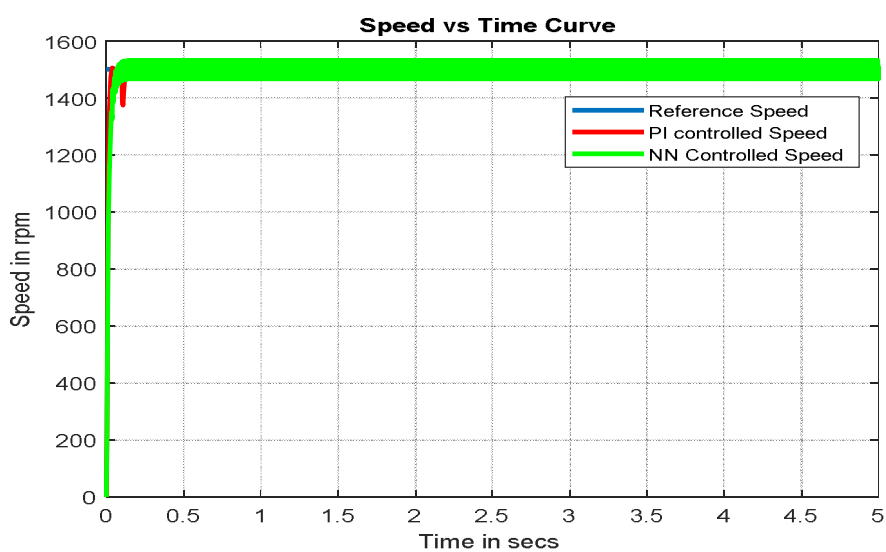


Рисунок 10 – Скорость двигателя BLDC с нейронным контроллером

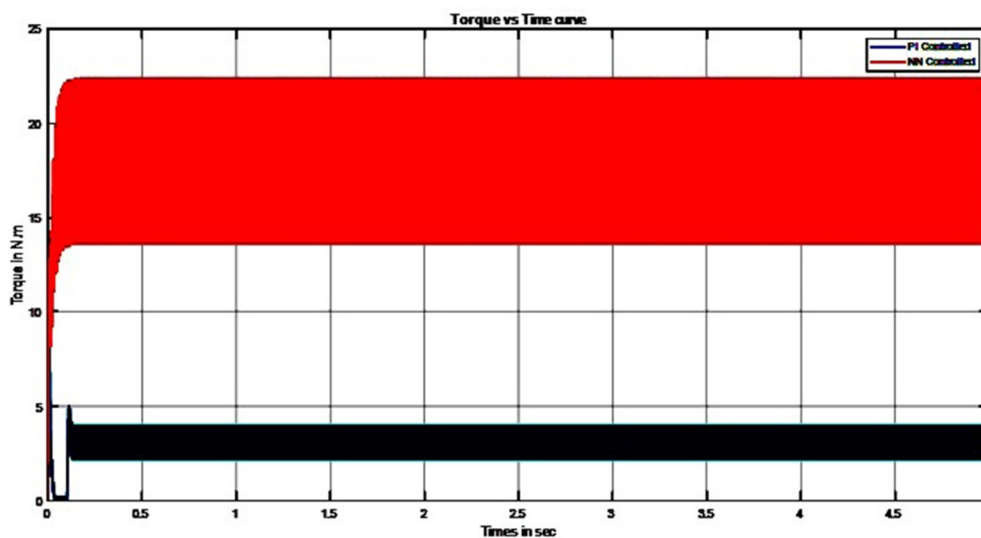


Рисунок 11 – Электромагнитный момент двигателя BLDC

## 5. Вывод

Мы разработали модель Simulink управления скоростью бесколлекторного двигателя постоянного тока с помощью схемы ПИД-регулятора. Параметры усиления мо-

дуля ПИД контролируются нейронной сетью и самонастройкой. Управление скоростью бесколлекторного двигателя постоянного тока осуществляется с помощью метода нейронной сети более эффективно и обеспечивает стабильность для различных приложений.

Результатом исследования является динамическая реализация предлагаемого контроллера на основе нейронной сети. Исследование представило нейросетевой контроллер двигателя BLDC с замкнутым контуром управления. Работоспособность и чувствительность контроллера проверены программой MATLAB-Simulink. Результаты моделирования показывают, что пульсации крутящего момента и пульсации тока были уменьшены, что улучшило характеристики трансмиссии. Сделан вывод о том, что, прикладывая к двигателю момент нагрузки с помощью нейросетевого контроллера, частота вращения двигателя не уменьшится. Управление скоростью осуществляется с помощью технологии мягкого управления ANN. Достигнутые в данной работе результаты обосновывают выбор методов управления двигателем, так как при ступенчатых нагрузках скорость двигателя при использовании не снижается. Предлагаемый нейроконтроллер. Результаты предлагаемого регулятора подтверждаются эталонными результатами, полученными математическими методами. Для системы. Для процесса обучения ИНС используется многослойное прямое обратное распространение с методом градиентного спуска.

Основная философия этой статьи заключается в изучении таких параметров, как время нарастания, установившееся время и перерегулирование. при ступенчатой нагрузке обороты двигателя не уменьшаются. В заключение отметим, что результаты моделирования показывают, что пульсации крутящего момента и пульсации тока уменьшаются, повышая производительность привода. С нейронным контроллером двигатель BLDC не имеет ошибок в установившемся режиме.

Обратная связь контроллера нейронной сети очень эффективна. Результаты для положительных результатов динамического исполнения двигателей BLDC в различных ситуациях нагрузки.

### Литература / References

1. Control differences between ac induction motor and brushless dc motor? Electrical Engineering Stack Exchange. Electronics.stackexchange.com (2019-12-20). Retrieved on 2019-12-26.
2. What is a BLDC Motor in a Washing Machine? Dumb Little Man. Retrieved 11 June 2019 / T.G. Wilson, P.H. Trickey, D.C. Machine. With Solid State Commutation, AIEE paper I. CP62-1372, October 07, 1962.
4. Jump up to: a b c d Clarence W. de Silva. Modeling and Control of Engineering Systems. CRC Press. – 2009. – P. 632–633.
5. Jump up to: a b c d Helmut Moczala. Small Electric Motors. – London : Institution of Electrical Engineers. – 1998. – P. 165–166.
6. Jump up to: a b c d Chang-liang Xia. Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. John Wiley and Sons. – 2012. – P. 18–19.
7. Custom axial flux permanent magnet BLDC. Turncircles. Retrieved 23 November 2020.
8. Levin E. Neural Network Architecture for Adaptive System Modelling and Control», Neural Networks / E. Levin, R. Gewirtzman, G.F. Inbar. – 1991. – № 4(2). – P. 185–191.
9. A. Mamadapur and G. Unde Mahadev, «Speed Control of BLDC Motor Using Neural Network Controller and PID Controller», 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC). – 2019. – P. 146–151.
10. Xiong G. Research on Speed Control System of Brushless DC Motor Based on Neural Network, 2015 8th / G. Xiong, C. Junguo, Jian and J. Biao // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Nanchang. – 2015. – P. 761–764.