

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ BLDC – РЕАЛИЗАЦИЯ MATLAB/SIMULINK



### BLDC MOTOR MODELLING AND CONTROL – A MATLAB/SIMULINK IMPLEMENTATION

#### До Чи Тхань

кандидат технических наук,  
факультет электротехники и электроники,  
Восточноазиатский технологический университет (EAUT),  
Вьетнам, Бак Нинь  
thanhdc@eaut.edu.vn

#### Фам Хью Чиен

магистр,  
электротехнический факультет,  
Промышленный университет Куангнинь, Вьетнам  
phamhuuchien86@gmail.com

**Аннотация.** Для обеспечения переменной скорости бесщеточный двигатель постоянного тока на сегодняшний день является лучшим типом двигателя для использования в различных приложениях. Он имеет широкое применение и имеет множество преимуществ перед коллекторными двигателями постоянного тока. Он обеспечивает лучшую производительность, чем коллекторные двигатели постоянного тока. В этой статье мы обсуждаем скоростную реакцию трехфазных двигателей BLDC с обратной связью. Реализованы результаты различной ширины полосы. При моделировании с обратной связью скорость двигателя поддерживается постоянной с помощью регулятора скорости. Датчики Холла используются для определения положения ротора. Инвертор используется для подачи управляющих импульсов для включения двигателя. Моделирование трехфазного бесщеточного двигателя постоянного тока с обратной связью выполняется в среде MATLAB. Результаты моделирования представлены в данной статье.

**Ключевые слова:** бесщеточные двигатели постоянного тока, регулятор гистерезисного тока, регулятор скорости.

#### Do Chi Thanh

Candidate of Technical Sciences,  
Faculty of Electrical  
and Electronics Engineering,  
East Asia University of Technology  
(EAUT),  
Vietnam, Bac Ninh  
thanhdc@eaut.edu.vn

#### Pham Huu Chien

Master's,  
Faculty of Electrical,  
Quang Ninh University of Industry,  
Vietnam  
phamhuuchien86@gmail.com

**Annotation.** For getting variable speed, brushless DC motor is the best type of motor to use in various applications today. It has wide applications and has many advantages over brushed DC motors. It gives better performance than brushed DC motors. In this article, we discuss the closed-loop speed response of three-phase Brushless DC (BLDC) motors. The results of different bandwidths are realized. In closed-loop simulation, the speed of the motor is kept constant by the speed controller. Hall effect sensors are used to sense the position of the rotor. The inverter is used to provide gate pulses to turn on the motor. The simulation of closed-loop three-phase brushless DC motor is performed in MATLAB environment. The simulation results are presented in this paper.

**Keywords:** Brushless DC Motors, Hysteresis Current Controller, Speed Controller.

## 1 . Введение

Бесщеточные двигатели постоянного тока пользуются большим спросом во многих отраслях промышленности, как коммерческих, так и бытовых, поскольку они имеют регулируемую скорость, что требуется в определенных приложениях. Машины постоянного тока используются уже несколько лет. Потому что у нас было не так много вариантов. Да, двигатель BLDC немного дороже по сравнению с асинхронным двигателем и двигателем постоянного тока, но в конечном итоге двигатель BLDC обеспечивает наилучшие характеристики. В коллекторных двигателях постоянного тока из-за наличия щеток и коллекторов он становится очень дорогим, так как требует регулярного обслуживания, а также эти двигатели имеют ненадежную работу. Щетка и коллектор имеют пониженный КПД из-за искрения. Этот недостаток привел к созданию двигателя с более высоким КПД – бесщеточного двигателя постоянного тока. Бесщеточный двигатель постоянного тока имеет множество преимуществ, таких как широкий диапазон скоростей, номинальная мощность и крутящий момент, более высокая инерция; меньше обслуживания, более высокая эффективность, компактный размер, высокий крутящий момент и удельная мощность. Бесщеточный двигатель постоянного тока имеет такие применения, как перемещение роботизированных манипуляторов для промышленного применения, в космосе, для проекции спутниковых панелей, для приводов в

аэрокосмической отрасли, приводов подачи для станков с ЧПУ. Вместо механической связи здесь используется электронная связь. был в матовых машинах постоянного тока. BLDC выглядит как обычный двигатель постоянного тока, поскольку он также имеет линейную связь. Между напряжением и скоростью, а также током и крутящим моментом. В этом двигателе обмотки якоря расположены на статоре, а постоянные магниты – на роторе. Датчики Холла используются для определения положения ротора, чтобы инициировать связь между статором и ротором.

## 2. Контроллер очень важен для BLDC

В данной статье показано, как управлять токами в электроприводе на базе BLDC с помощью гистерезисных контроллеров. Источник постоянного напряжения питает BLDC через управляемый трехфазный инвертор. На контроллер мотора подается линейное изменение запроса тока. Момент нагрузки квадратично зависит от скорости ротора. Подсистема управления реализует текущую стратегию управления на основе гистерезиса. Подсистема Scores содержит области видимости, которые позволяют вам видеть результаты моделирования.

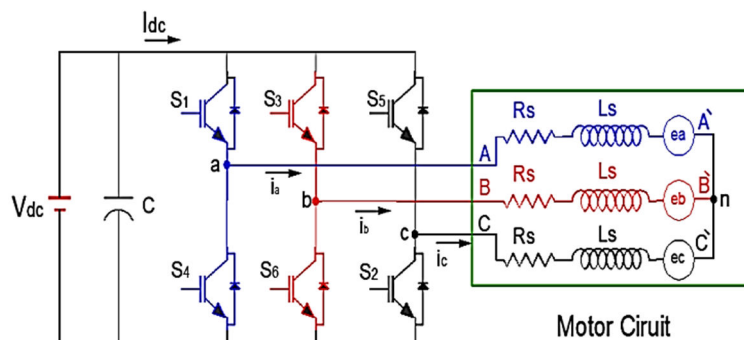


Рисунок 1 – Упрощенная эквивалентная схема двигателя BLDC, приводимого в действие 3-мостовым инвертором

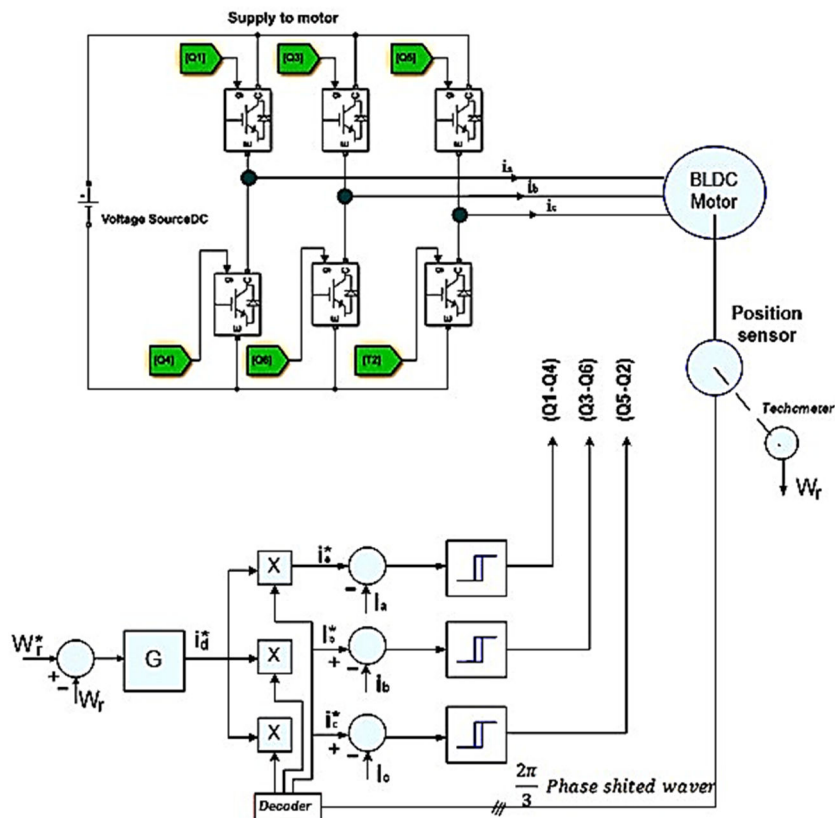


Рисунок 2 – Принцип управления током с гистерезисом BLDC

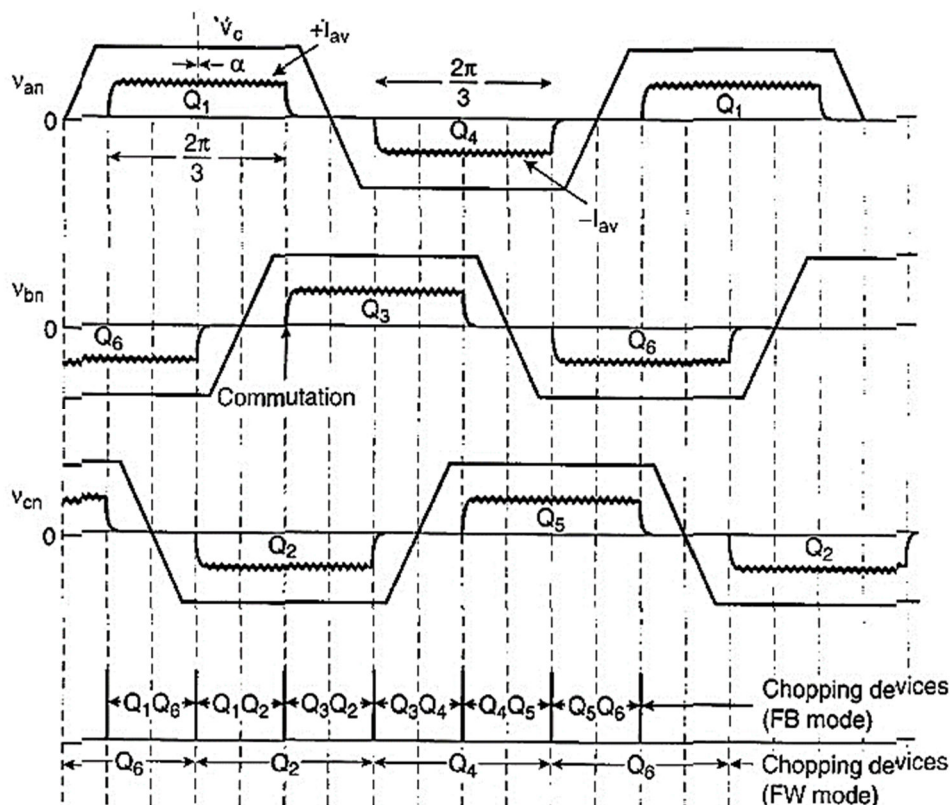


Рисунок 3 – Токовая, динамическая отражательная способность в принципе управления полосой гистерезиса

### 3. Математическая модель BLDC-двигателя.

Упрощенная эквивалентная схема двигателя BLDC показана на рисунке 1, где каждая фазная обмотка статора представлена сопротивлением ( $R_s$ ) и эквивалентной индуктивностью ( $L_s$ ). Обратная ЭДС каждой фазы ( $e_{an}$ ,  $e_{bn}$  и  $e_{cn}$ ) имеет синусоидальную форму в случае двигателя BLAC, но имеет трапецевидную форму в случае BLDC. Обратные ЭДС сдвинуты на 120 электрических градусов друг от друга. Двигатель управляется трехфазным инвертором, где положение магнитного поля ротора должно немедленно определяться для правильной коммутации с помощью трех датчиков Холла, установленных внутри вышеуказанного двигателя BLDC. корпус статора [18].

Следующий набор уравнений можно использовать для построения математической модели двигателя BLDC в случае трапецеидальных ЭДС. Во-первых, напряжения на клеммах определяются уравнениями (1) – (3) для трех фаз a, b и c соответственно:

$$V_{an} = R_a i_a + \frac{d}{dt} (L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c) + e_{an}. \quad (1)$$

$$V_{bn} = R_b i_b + \frac{d}{dt} (L_b i_b + M_{ba} i_b + M_{bc} i_c) + e_{bn}. \quad (2)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + \frac{d}{dt} (L_c i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b) + e_{cn}. \quad (3)$$

Поскольку обмотки трехфазного статора симметричны, самоиндукции обмоток равны. Аналогично, взаимные индуктивности также равны. Соответственно, справедливы соотношения (4), (5) и (6):

$$R_a = R_b = R_c = R_s. \quad (4)$$

$$L_a = L_b = L_c = L. \quad (5)$$

$$M_{ab} = M_{ba} = M_{ac} = M_{ca} = M_{bc} = M_{cb} = M. \quad (6)$$

Подстановка этих значений в уравнения (1) – (3) дает следующие соотношения [19, 20]:

$$V_{an} = R_s i_a + (L - M) \frac{d}{dt} i_a + e_{an}. \quad (7)$$

$$V_{bn} = R_s i_b + (L - M) \frac{d}{dt} i_b + e_{bn}. \quad (8)$$

$$V_{cn} = R_s i_c + (L - M) \frac{d}{dt} i_c + e_{cn}. \quad (9)$$

где  $L$  – самоиндукция,  $M$  – взаимная индуктивность и  $(L_s = L - M)$  – эквивалентная фазовая индуктивность. Для трапецевидной обратной ЭДС можно использовать следующие соотношения для представления наведенной ЭДС в двигателе BLDC:

$$e_a = K_e \omega_m f_a(\theta_e). \quad (10)$$

$$e_b = K_e \omega_m f_b(\theta_e). \quad (11)$$

$$e_c = K_e \omega_m f_c(\theta_e). \quad (12)$$

где  $K_e$  – постоянная противо – ЭДС,  $\omega_m$  – механическая скорость в рад/с, а  $f_a(\theta_e)$ ,  $f_b(\theta_e)$  и  $f_c(\theta_e)$  – трехфазные трапецевидные сигналы единичной величины, как объяснено в Приложении А.

Электромагнитный крутящий момент, развиваемый двигателем BLDC, определяется следующим уравнением [19]:

$$T_{em} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_m}. \quad (13)$$

Электромагнитный крутящий момент, создаваемый двигателем BLDC, используется для управления механической нагрузкой и преодоления механического трения и инерции двигателя во время ускорения, как указано в следующем уравнении [18, 19]:

$$T_{em} = T_L + J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m. \quad (14)$$

#### 4. Результаты моделирования и моделирования в Matlab и Simulink

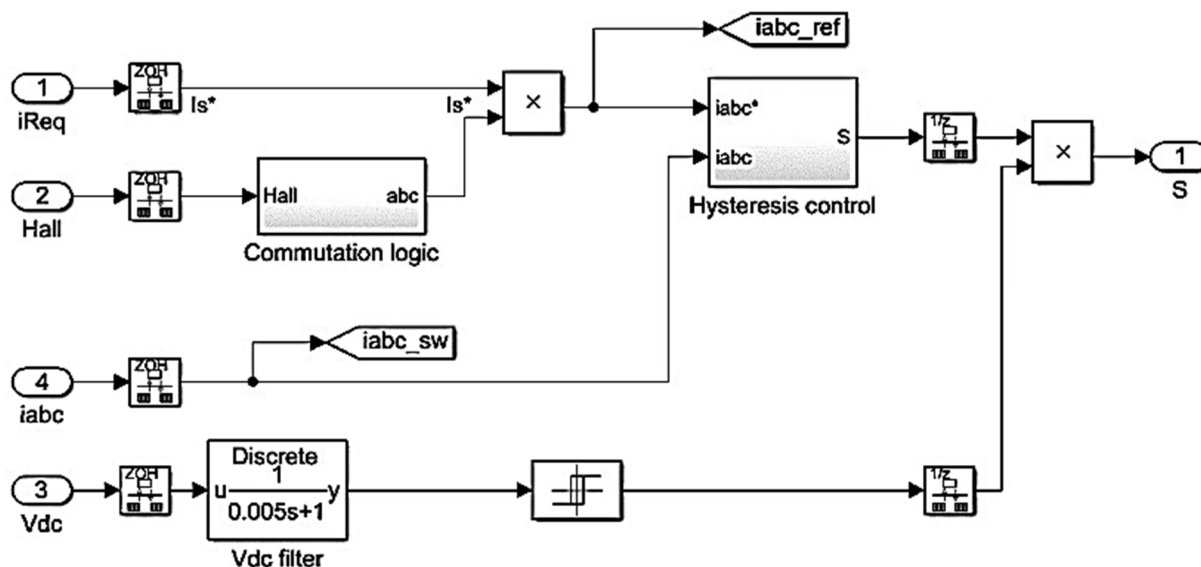


Рисунок 4 – Модель в Matlab и simulink BLDC Контроль тока с гистерезисом

Как показано на рисунке, моделирование выглядит точно так же, как его блок-схема, упомянутая выше. Он состоит в основном из четырех блоков, таких как блок инвертора, блок двигателя BLDC и регулятор скорости. Инвертор питается от 36 напряжений постоянного тока. BLDC состоит из тока и противо-ЭДС трех фаз. Он также включает крутящий момент и скорость двигателя в нагруженном состоянии. Сигналы

Холла поступают от двигателя и возвращаются в блок регулятора скорости. Фактический ток измеряется в блоке измерения тока и подается в блок регулятора скорости. Скорость двигателя в нагруженном состоянии также передается в блок контроллера. Импульсы затвора являются результатом работы блока контроллера и подаются на инвертор для включения любых двух переключателей с 3-х фаз. Вот и завершилась работа по замкнутому циклу.

### 5. Результаты моделирования

Двигатель BLDC, использованный для моделирования, показан на рисунке 5. Были зафиксированы различные параметры моделирования. На следующих рисунках показаны некоторые результаты, относящиеся к скорости вращения 1500 об/мин и моменту нагрузки 10 Нм.

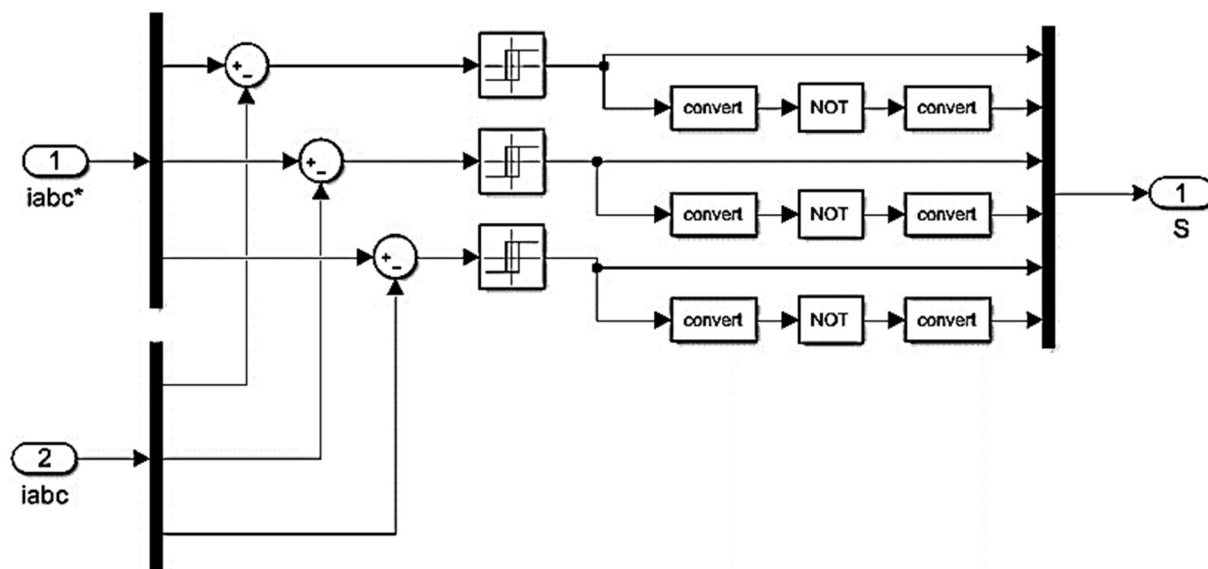


Рисунок 5 – Регулятор тока с гистерезисом

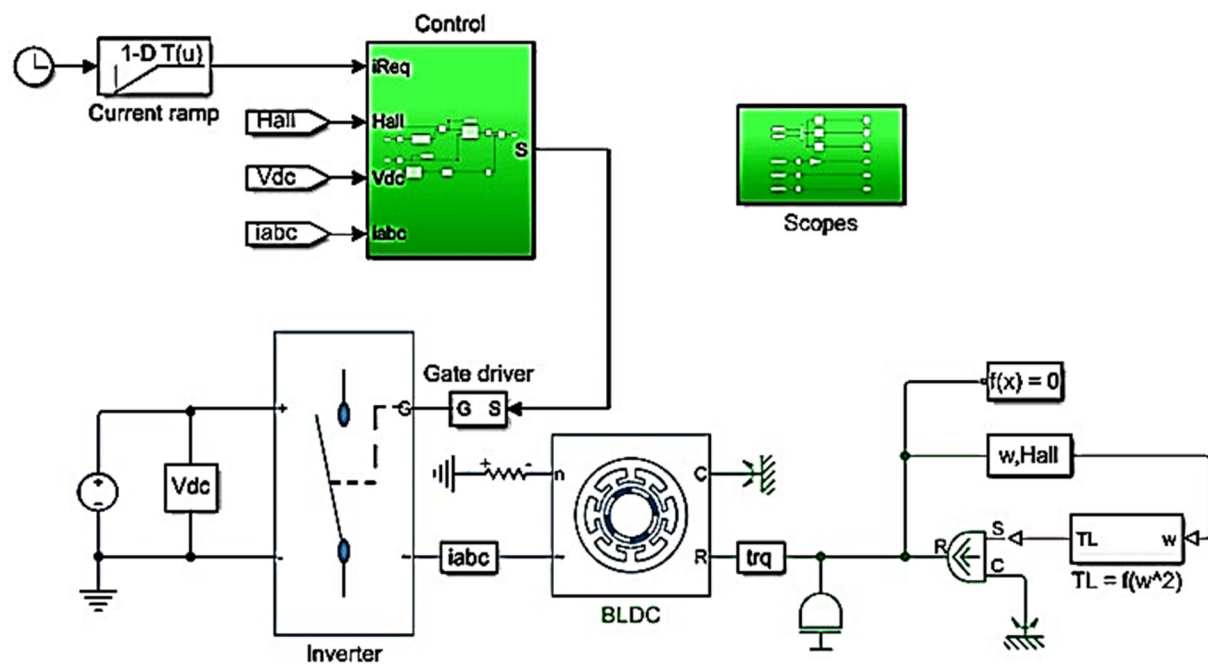


Рисунок 6 – Моделирование управления гистерезисным током BLDC в Matlab и Simulink

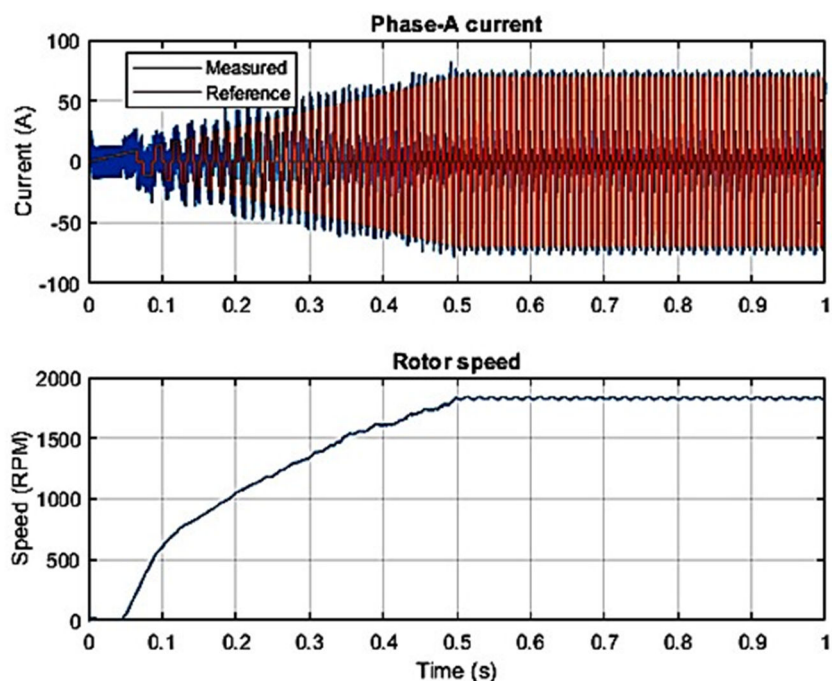


Рисунок 7 – Скоростная характеристика для шага 1750 об/мин, момент нагрузки 3,5 Нм

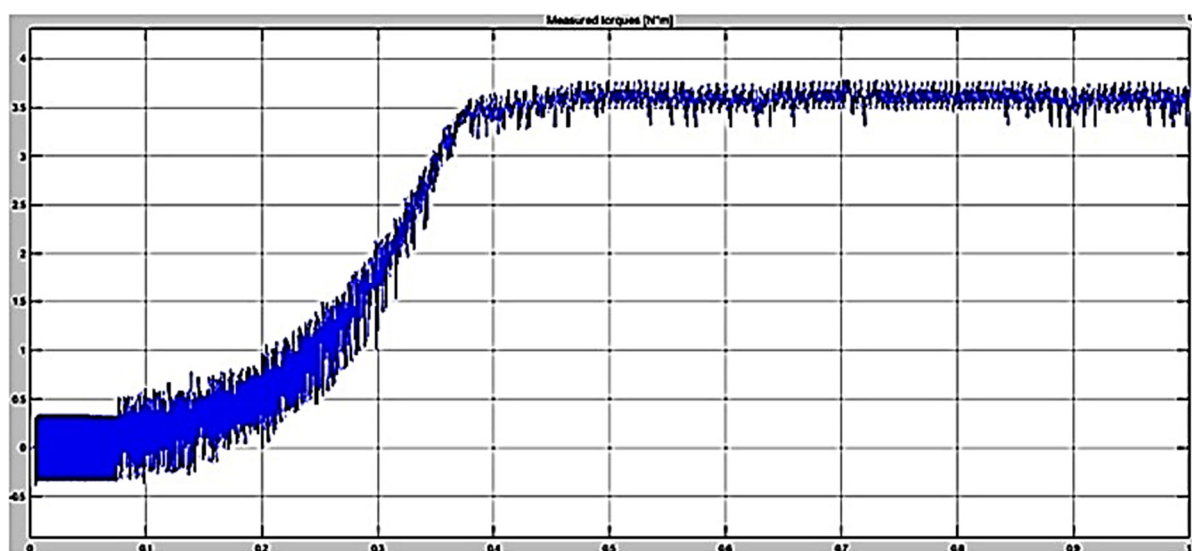


Рисунок 8 – Измеренные крутящие моменты [Н.м]

## 6. Вывод

Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного контроллера с точки зрения удовлетворительной работы. Предложенная конструкция показала хорошие динамические характеристики и регулировку скорости. Кроме того, формы сигналов электромагнитного момента и тока статора искажаются из-за изменения ширины полосы гистерезиса. Это может произойти из-за того, что в методе управления током по гистерезису переключение переключателей инвертора может зависеть от диапазона гистерезиса. Недостатком уменьшения полосы пропускания является то, что оно может увеличить потери на переключение. Представленная модель была успешно разработана в среде Matlab/Simulink и протестирована. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного контроллера с точки зрения удовлетворительной работы.

## Литература / References

1. A Fast Commutation Error Correction Method for Sensorless BLDC Motor Considering Rapidly Varying Rotor Speed / H. Jin, G. Liu, H. Li, B. Chen, H. Zhang. *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2022. – № 69. – P. 3938–3947.
2. Jin H. Commutation Error Closed-Loop Correction Method for Sensorless BLDC Motor Using Hardware-Based Floating Phase Back-EMF Integration / H. Jin, G. Liu, S. Zheng. *IEEE Trans. Ind. Inform.* – 2022. – № 18. – P. 3978–3986.
3. Adaptive Commutation Error Compensation Strategy Based on a Flux Linkage Function for Sensorless Brushless DC Motor Drives in a Wide Speed Range / S. Chen, X. Zhou, G. Bai, K. Wang, L. Zhu. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2018. – № 33. – P. 3752–3764.
4. Fast Commutation Error Compensation for BLDC Motors Based on Virtual Neutral Voltage / D. Zhao, X. Wang, B. Tan, L. Xu, C. Yuan, Y. Huangfu. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2021. – № 36. – P. 1259–1263.
5. Lee Y. A New Method to Minimize Overall Torque Ripple in the Presence of Phase Current Shift Error for Three-Phase BLDC Motor Drive. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* – 2019. – № 42. – P. 225–231.
6. Zhang H. Fast Commutation Error Compensation Method of Sensorless Control for MSCMG BLDC Motor with Nonideal Back EMF / H. Zhang, H. Li. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2021. – № 36. – P. 8044–8054.
7. Closed-Loop Compensation Strategy of Commutation Error for Sensorless Brushless DC Motors with Nonideal Asymmetric Back-EMFs / H. Jin, G. Liu, H. Li, H. Zhang. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2021. – № 36. – P. 11835–11846.
8. High-Precision Sensorless Optimal Commutation Deviation Correction Strategy of BLDC Motor with Asymmetric Back EMF / H. Zhang, G. Liu, X. Zhou, S. Zheng. *IEEE Trans. Ind. Inform.* – 2021. – № 17. – P. 5250–5259.
9. Sensorless High-Precision Position Correction Strategy for a 100 kW@20 000 r/min BLDC Motor with Low Stator Inductance / S. Chen, W. Sun, K. Wang, G. Liu, L. Zhu. *IEEE Trans. Ind. Inform.* – 2018. – № 14. – P. 4288–4299.
10. A Commutation Error Compensation Strategy for High-Speed Brushless DC Drive Based on Adaline Filter / L. Wang, Z.Q. Zhu, H. Bin, L. Gong. *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2021. – № 68. – P. 3728–3738.
11. A Sensorless Commutation Error Correction Method for High-Speed BLDC Motors Based on Phase Current Integration / Y. Li, X. Song, X. Zhou, Z. Huang, S. Zheng. *IEEE Trans. Ind. Inform.* – 2020. – № 16. – P. 328–338.
12. Ebadpour M. Fast Fault-Tolerant Control for Improved Dynamic Performance of Hall-Sensor-Controlled Brushless DC Motor Drives / M. Ebadpour, N. Amiri, J. Jatskevich. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2021. – № 36. – P. 14051–14061.
13. PWM Switching Delay Correction Method for High-Speed Brushless DC Drives / L. Yang, Z.Q. Zhu, L. Gong, H. Bin. *IEEE Access.* – 2021. – № 9. – P. 81717–81727.
14. A PLL-Based Novel Commutation Correction Strategy for a High-Speed Brushless DC Motor Sensorless Drive System / C. Gu, X. Wang, X. Shi, Z. Deng. *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2018. – № 65. – P. 3752–3762.
15. Kolano K. Improved Sensor Control Method for BLDC Motors. *IEEE Access.* – 2019. – № 7. – P. 186158–186166.
16. Park J.S. Online Advanced Angle Adjustment Method for Sinusoidal BLDC Motors with Misaligned Hall Sensors / J.S. Park, K.-D. Lee. *IEEE Trans. Power Electron.* – 2017. – № 32. – P. 8247–8253.
17. Aladsani A.S. BLDC Motor Drives: A Single Hall Sensor Method and a 160° Commutation Strategy / A.S. Aladsani, M.E. AlSharidah, O. Beik. *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2021. – № 36. – P. 2025–2035.
18. Baszynski M. Unipolar Modulation for a BLDC Motor with Simultaneously Switching of Two Transistors with Closed Loop Control for Four-Quadrant Operation / M. Baszynski, S. Pirog. *IEEE Trans. Ind. Inform.* – 2018. – № 14. – P. 146–155.
19. Xia C.-L. *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*; John Wiley & Sons: Singapore; Pte. Ltd. : Solaris, Singapore, 2012.