

УДК 621.313.292

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.045](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.045)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЙ В БЕСКОНТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О.А. Киселёва¹, Т.В. Попова², А.Ю. Тимошкин³

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

¹*e-mail: kis.ola@mail.ru*

²*e-mail: popova1958@inbox.ru*

³*e-mail: styl31@yandex.ru*

Резюме: В работе проводится анализ формирования дискретного векторного эквивалента для управления бесконтактным двигателем постоянного тока. Рассмотрены вопросы применения наблюдателей состояния вместо электромеханических датчиков положения ротора. Показана особенность построения наблюдателя состояния, заключающаяся в том, что информация на его вход поступает от непрерывного рабочего токового поля, а на выходе он формирует дискретное вращающее управляющее поле за счет переключений обмоток синхронного двигателя силовым инвертором напряжения, базируясь на параметрах двигателя и исполнительного устройства. Для обеспечения синхронизации необходимо решать вопрос о частоте опроса датчиков и возможности обработки этой информации, что ведет к запаздываниям сигналов. При этом необходимо учитывать не только временные зависимости, связанные с началом и окончанием импульсов, но и пространственные, связанные с чередованием базовых ведущих векторов. Проведена оценка эффективности управления в электроприводах с бесконтактными двигателями постоянного тока и датчиками наблюдения. В некоторых случаях применение наблюдателей скорости в электроприводе приводит к уменьшению диапазона регулирования скорости. Построены графики переходных процессов в электроприводе при различных значениях параметров регулятора скорости.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, наблюдатель состояния, переходные характеристики, управляющее дискретное поле.

Для цитирования: Киселёва О.А., Попова Т.В., Тимошкин А.Ю. Особенности применения наблюдателя состояний в бесконтактном двигателе постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KiselevaSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.045

FEATURES OF THE APPLICATION OF THE OBSERVER STATES IN A CONTACTLESS DC MOTOR

O.A. Kiseleva, T.V. Popova, A.Y. Timoshkin

Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation

Abstract: The paper deals with the analysis of the formation of discrete vector an equivalent tape to control brushless DC motor. The issues of using state observers instead of electromechanical rotor position sensors are considered. Shows the feature of constructing an observer status, for localdate that information on its input comes from continuous work-th current field, and the output it generates discrete torque control field switching of the windings of the synchronous motor power voltage inverter based on the motor parameters and actuators. To ensure synchronization, it is necessary to decide on the frequency of sensor polling and the possibility of processing this information, which leads to signal delays. It is necessary to take into account not only the time dependence associated with the beginning and end of the pulses, but also the spatial dependence associated with the alternation of the basic leading vectors. The estimation of control efficiency in electric drives with contactless DC motors and sensors of supervision is carried out. In some cases, the use of speed observers in the electric drive leads to a

decrease in the speed control range. Graphs of transient processes in the electric drive at different values of the speed controller parameters are constructed.

Keywords: contactless DC motor, state observer, transient characteristics, discrete control field.

For citation: Kiseleva O.A., Popova T.V., Timoshkin A.Yu. Features of the application of the observer states in a contactless dc motor. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KiselevaSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.045 (In Russ.).

Введение

Современный электропривод с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) представляет системную совокупность аппаратной и программной частей. Многие проблемы управления в электроприводе решаются путем замены его электромеханической части электропривода, которая не выполняет преобразование электрической энергии в механическую энергию, а формируют информационные сигналы о состоянии исполнительного элемента и выходной координаты. Эту замену можно осуществить путем создания более современных датчиков с расширенными функциональными возможностями, используя микроконтроллер, как это уже сделано для систем управления в электроприводе [1- 4].

Сигналы обратных связей должны нести достоверную информацию, которую можно получить непосредственным измерением с помощью различных электромеханических датчиков, или использовать косвенные измерения. Используя принцип косвенных измерений, зная параметры объекта управления и исполнительного устройства, БДПТ, можно алгоритмически решить вопрос о получении нужной информации о координатах состояния электропривода.

Основной целью является разработка бездатчикового электропривода с БДПТ, обеспечивающего широкий диапазон регулирования с высокими динамическими характеристиками.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- рассмотрена структура наблюдателя состояния, на вход которого поступает информация от непрерывного рабочего токового поля, а на выходе он формирует дискретное вращающееся управляющее поле за счет переключений обмоток синхронного двигателя силовым инвертором напряжения, базируясь на параметрах двигателя и исполнительного устройства;
- исследован вопрос о частоте опроса датчиков и возможности обработки этой информации.

Материалы и методы

Наблюдатель состояния для электропривода с БДПТ – это специальные алгоритмы, с помощью которых можно восстановить значение требуемых координат, то есть провести оценивание. Сигналы, которые снимают с наблюдателя состояния принято называть оценками.

По сигналам оценкам с наблюдателя состояния должно формироваться управляющее дискретное поле, которое за тем усиливается в инверторе, и создает токи, протекающие в обмотках исполнительного двигателя, создавая тем самым непрерывное рабочее токовое поле, на базе которого формируются входные сигналы для наблюдателя.

Некоторые проблемы, которые возникают в системах с наблюдателями, свойственны также системам с датчиками положения ротора, так и датчиками скорости. Иногда применение наблюдателей скорости ограничивает диапазон регулирования, это

чаще всего связано с изменением внутренних параметров, таких как активное сопротивление обмотки, её индуктивность, момент инерции и другие.

БДПТ часто применяются в промышленных электроприводах из-за их:

- высокой удельной мощности;
- высокому отношению крутящего момента к моменту инерции;
- малой величиной пульсации момента;
- возможности регулирования на малых скоростях;
- возможности регулирования момента при нулевой скорости;
- высокому КПД и малому размеру.

Использование перечисленных преимуществ возможно благодаря применению векторного управления. Векторное управление позволяет обеспечить требуемые динамические характеристики электропривода с БДПТ, и высокую эффективность, особенно в переходных процессах, и предотвращает перегрузку двигателя, контролируя момент нагрузки. Для эффективного векторного управления требуется наличие датчиков положения ротора, но установка датчиков положения увеличивает общую стоимость электропривода и уменьшает его надежность. Устранение необходимости в датчиках положения открывает для электропривода с БДПТ возможности более широкого применения, и данная задача по настоящее время остается открытым вопросом и является предметом обширных исследований многих научных центров. В литературе описано несколько подходов для решения данной задачи, основанных на моделях в пространстве состояний, на различных вариациях фильтра Калмана, наблюдателях состояния со скользящим режимом работы, и методах «видимого положения» [5- 8].

Методы с наблюдателями состояний и методы с фильтрами Калмана основаны на моделях двигателей и отличаются высокой вычислительной сложностью при высокой точности. Другой метод, использующий «видимое» или «магнитное» положение ротора, основан на измерении компонент «фазовой» индуктивной нагрузки и является хорошим решением для управления БДПТ на малых скоростях и при поддержании статической нагрузки, но требования к аппаратным и программным средствам для него относительно велики.

Результаты и их обсуждение

Рассматривается простая и эффективная структура наблюдателя, принцип которого заключается в определении величины наводимой ЭДС и доработан введением более сложной функции коррекции, отличающейся от традиционной. Наблюдатель состояний применяется в системе, структура которой представлена на Рисунке 1.

Двигатель питается от инвертора. Система управления включает в себя контуры регулирования тока в двух независимых компонентах, регулятор скорости и наблюдателя состояний. В схеме используются блоки, которые предназначены для преобразования векторов в системах координат: трехфазной; неподвижной и вращающейся. Расчетное значение положения ротора используется в контурах регулирования тока, а расчетное значение скорости – в регуляторе скорости.

Предлагаемая схема наблюдателя позволяет рассчитывать положение ротора, основываясь на величине наводимой ЭДС в альфа-бета-системе координат, неподвижной относительно статора. Данная система координат была выбрана в силу ее простой формы и отсутствия необходимости преобразований в наблюдателе на величину оцененного угла поворота ротора. Синус и косинус угла поворота ротора рассчитываются исходя из величин компонент вектора ЭДС, а их отношение к модулю вектора ЭДС позволяет оценить величину угловой скорости вращения ротора.

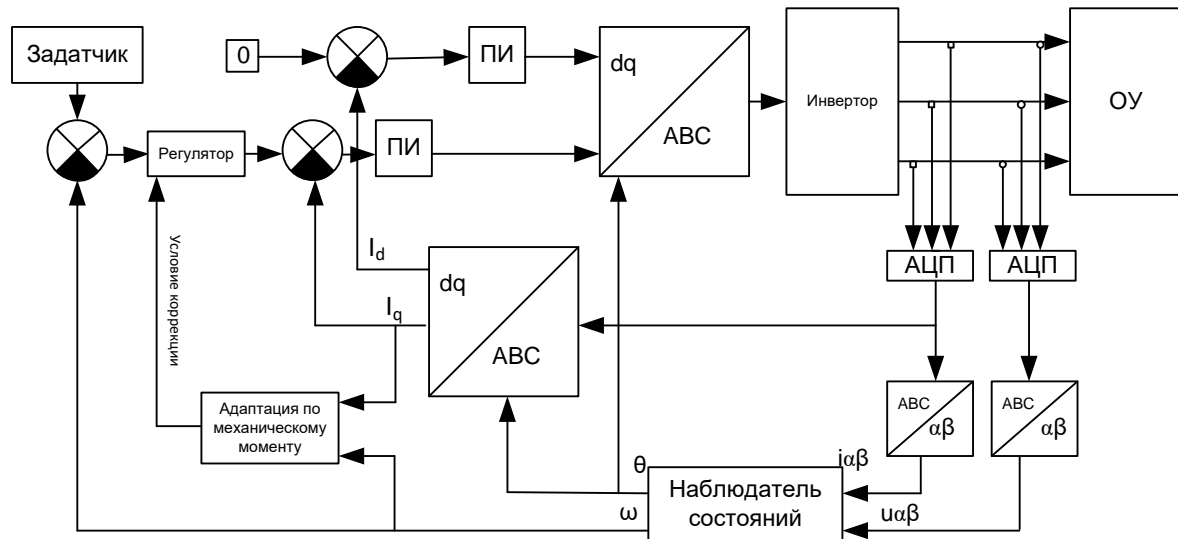


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока и наблюдателем состояния
Figure 1 – Functional diagram of an electric drive with a contactless motor direct current and state observer

Внутренняя структура наблюдателя зависит от функции коррекции (корректирующей функции). Наблюдатель состоит из электродинамической части и дополнительного корректирующего контура.

Общепринято использовать первые два уравнения электродинамики, в которых наводимая ЭДС рассматривается как возмущение.

$$\begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{R}{L} \cdot i_\alpha - \frac{1}{L} \cdot e_\alpha + \frac{1}{L} \cdot u_\alpha; \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{R}{L} \cdot i_\beta - \frac{1}{L} \cdot e_\beta + \frac{1}{L} \cdot u_\beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где R – сопротивление статора;

i_α, i_β – электрические токи статора проекциях α и β ;

u_α, u_β – разности потенциалов в проекциях α и β ;

e_α, e_β – наводимая ЭДС в проекциях α и β ;

L – индуктивность статора.

В этом случае можно получить следующее полное уравнение состояний.

$$\begin{aligned} \dot{x}_E &= A_E \cdot x_E + B_E \cdot u; \\ y &= C_E \cdot x_E, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$x_E = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}.$$

Для разрабатываемой системы управления, возможно, использовать наблюдатель Люенбергера с коррекцией по величине ошибки между измеренной и расчетной величиной токов статора. Предполагая, что производная от величины возмущения (ЭДС) мала, можно записать следующее уравнение состояний для наблюдателя:

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot \hat{i}_\alpha - \frac{1}{L} \cdot \hat{e}_\alpha + \frac{1}{L} \cdot \hat{v}_\alpha + K_{i\alpha} (i_\alpha - \hat{i}_\alpha); \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot \hat{i}_\beta - \frac{1}{L} \cdot \hat{e}_\beta + \frac{1}{L} \cdot \hat{v}_\beta + K_{i\beta} (i_\beta - \hat{i}_\beta); \\ \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} &= K_{e\alpha} (i_\alpha - \hat{i}_\alpha); \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} &= K_{e\beta} (i_\beta - \hat{i}_\beta).\end{aligned}\tag{3}$$

Или в матричной форме:

$$\hat{x}_E = A_E \cdot \hat{x}_E + B_E \cdot u + K[\Delta i],\tag{4}$$

где K – коэффициент коррекции.

Такое решение приемлемо с точки зрения быстродействия, однако, возможна реализация и более точной модели.

Недостатком упрощенной модели в связи с принятым предположением является наличие настраиваемого коэффициента коррекции (поправочный коэффициент), зависящего от рабочей точки (переменный коэффициент усиления). Достаточным фактором, влияющим на величину этого коэффициента, является угловая скорость. Коррекция особенно важна в том случае, когда диапазон регулирования велик. В случае небольшого диапазона регулирования коэффициент может быть константой. Однако, в противном случае, более качественный результат может быть получен с использованием нечеткой логики или нейронных сетей. Поскольку наблюдатель оценивает величину наводимой ЭДС, для расчета положения и скорости могут быть использованы следующие преобразования:

$$\begin{aligned}\sin \hat{\Theta} &= -\frac{\hat{e}_\alpha}{|\hat{e}|}; \\ \cos \hat{\Theta} &= -\frac{\hat{e}_\beta}{|\hat{e}|};\end{aligned}\tag{5}$$

где $|\hat{e}| = \sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}$; $|\hat{\omega}| = \frac{|\hat{e}|}{K_e}$.

Умножение ошибки наблюдателя на постоянный коэффициент коррекции K даст структуру наблюдателя с пропорциональной обратной связью. Для модификации работы наблюдателя может быть предложена более сложная функция расчета ошибки модели по аналогии с П-, ПИ-, ПИД-законами регулирования. Это приводит к более общему выражения для наблюдателя состояний:

$$\hat{x}_E = A_e \cdot \hat{x}_E + B_E \cdot u + F[\Delta i],\tag{6}$$

где $F[\Delta i]$ – функция коррекции.

Функция коррекции может работать, например, в скользящем режиме (с переключением с одной структуры на другую в зависимости от величины ошибки), в

интегральном скользящем режиме, или иметь другую основанную на интегрировании структуру. Такое представление структуры наблюдателя может использоваться для оценки положения ротора для других типов двигателей.

В случае пропорционально-интегральной функции коррекции выражение для ошибки наблюдателя приобретает форму:

$$F_i[\Delta i] = K_p [\Delta i] + K_i \int [\Delta i] dt. \quad (7)$$

На основе большого количества испытаний по математической модели, можно сделать вывод о использовании более сложные конструкции корректирующей функции, например, пропорционально-интегрально-инегрирующая:

$$F_2[\Delta i] = K_p [\Delta i] + K_i \int [\Delta i] dt + K_{ii} \int \left| \int [\Delta i] dt \right| dt. \quad (8)$$

Преимущество введения интеграла и двойного интеграла заключается в обеспечении астатического характера наблюдения (оценки параметров объекта) даже во время переходного процесса по скорости, при котором имеет место быстрое изменение и скорости, и токов, когда изменение наведенных ЭДС имеет несинусоидальный характер.

Оценка величины наведенной ЭДС от наблюдателя позволяет рассчитать новые значения положения и скорости ротора в каждый дискретный момент времени работы алгоритма. В действительности, наблюдаемые значения ЭДС продолжают изменяться синусоидально только, когда ротор находится в движении. Астатический характер корректирующей обратной связи наблюдателя важен для следования за положением с малой ошибкой, т. е. малым сдвигом по фазе. В соответствии с симметрией выражения относительно токов и ЭДС, структура параметров наблюдателя состоит из шести различных элементов и одного (седьмого) коэффициента k_e , используемого для масштабирования амплитуды, рассчитанной ЭДС к величине скорости вращения.

Умножение ошибки наблюдателя на постоянный коэффициент коррекции K даст структуру наблюдателя с пропорциональной обратной связью. Как показано выше, для модификации работы наблюдателя может быть использована более сложная функция расчета ошибки модели по аналогии с П-, ПИ-, ПИД-законами регулирования. Это приводит к более общему выражению для наблюдателя состояний.

Функция коррекции может работать, например, в скользящем режиме (с переключением с одной структуры на другую в зависимости от величины ошибки), в интегральном скользящем режиме, или иметь другую основанную на интегрировании структуру.

Принцип векторного управления заключается в создании поля статора с такой амплитудой и углом поворота относительно поля ротора, чтобы вызывать ускорение или торможение ротора в зависимости от его текущей скорости [9 - 11].

Чтобы выделить компоненты вектора поля статора не вращающиеся синхронно с полем ротора используется переход в dq- систему координат. Компонента I_d , всегда параллельная вращающемуся вектору поля ротора, поддерживается равной нулю в своем контуре регулирования. Вторая компонента I_q задается внешним контуром скорости в зависимости от величины рассогласования.

Возмущающим воздействием, на объект управления, влияющим на его характеристики является, внешний механический момент T_m , приложенный к ротору – нагрузка. Используя комбинированный принцип регулирования во внешнем контуре по

скорости, возможно, компенсировать влияние возмущения с большим быстродействием, чем в случае обычной обратной связи. Это достигается введение контура корректирующей обратной связи по величине механического момента.

Традиционно, для измерения частоты вращения используются тахогенераторы, датчики Холла, ДУС, лазерные датчики угла поворота и другие устройства. При использовании датчиков угловой скорости вращения электропривода либо ухудшается надежность системы, либо значительно возрастает ее стоимость. В предложенной системе управления сигнал обратной связи по скорости и углу поворота ротора формируется наблюдателем состояний – компьютерной модели БДПТ. Входными данными модели являются токи статора и фазные управляющие напряжения. В силу простоты устройства датчиков тока и напряжения бездатчиковая система управления обладает большей надежностью и меньшей стоимостью. На Рисунках 3 и 4 приведены графики переходных процессов в электроприводе с БДПТ по возмущающему воздействию – моменту нагрузки при различных сигналах задания и регуляторах скорости.

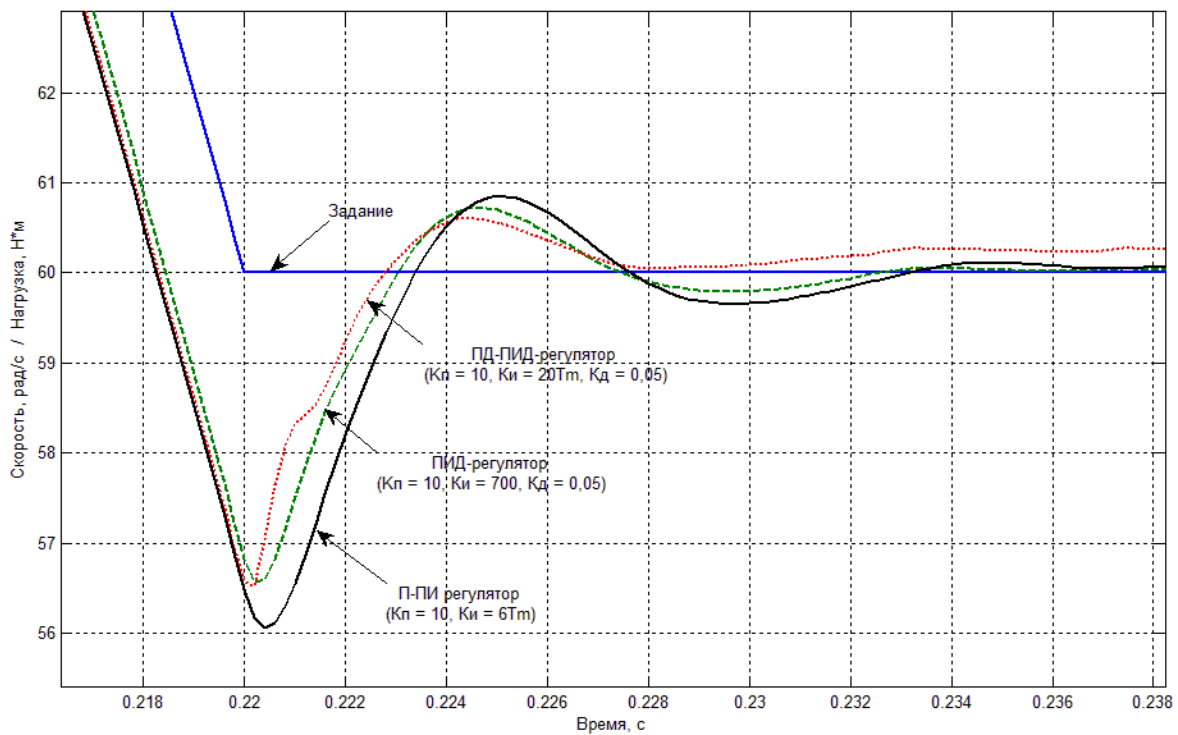


Рисунок 3 – Переходные процессы в электроприводе с БДПТ с наблюдателем состояния с различными регуляторами скорости при ступенчатом подключении нагрузки
 Figure 3 – Transient processes in an electric drive with a BDTT with a state observer with various speed controllers with a stepwise connection of the load

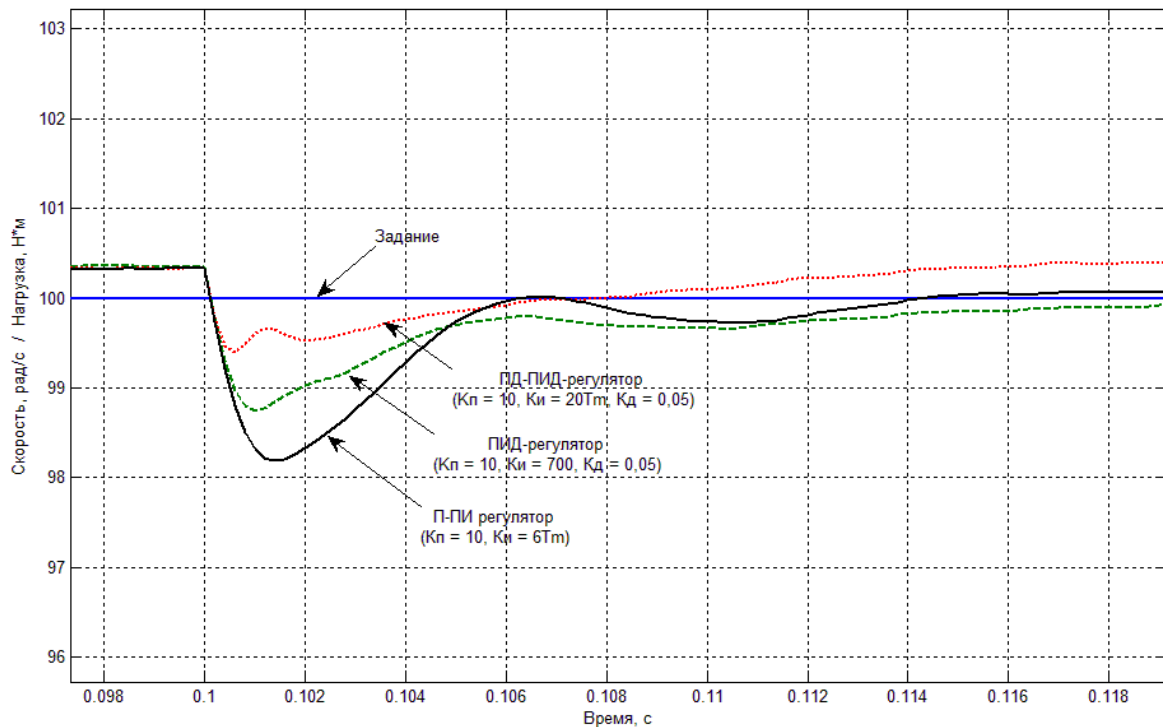


Рисунок 4 – Переходные процессы в электроприводе с БДПТ и различными регуляторами скорости при ступенчатом подключении нагрузки
Figure 4 – Transient processes in an electric drive with a BDTT and various speed controllers with a stepwise connection of the load

Заключение

В представленной статье рассмотрены вопросы построения наблюдателя состояния для БДПТ, с учётом того, что информация на вход наблюдателя состояния поступает от непрерывного рабочего токового поля. На выходе он формирует дискретное вращающее управляющее поле за счет переключений обмоток синхронного двигателя силовым инвертором напряжения, базируясь на параметрах двигателя и исполнительного устройства.

Для обеспечения синхронизации необходимо решать вопрос о частоте опроса датчиков и возможности обработки этой информации, что ведет к запаздываниям сигналов. При этом необходимо учитывать не только временные зависимости, связанные с началом и окончанием импульсов, но и пространственные, связанные с чередованием базовых ведущих векторов.

Рассмотрена структура наблюдателя состояния для БДПТ, принцип которого заключается в определении величины наводимой ЭДС и введением более сложной функции коррекции, отличающейся от традиционной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Т.В., Киселёва О.А. Учет интервалов дискретности модели системы с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Интеллектуальные информационные системы*. 2012: 113-114.
2. Киселёва О.А., Киселёв Д.П., Попова Т.В. Функции регулятора тока системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование,*

- оптимизация и информационные технологии*; 2015;1(8): 7.
3. Киселёва О.А., Киселёв Д.П., Попова Т.В. Функции регулятора тока системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*; 2015;1(8): 7.
 4. Винокуров С.А., Киселёва О.А., Попова Т.В. Идеальное векторное управление бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;1(16): 13.
 5. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Попова Т.В. Дискретный эквивалент идеальному векторному управлению бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017.
 6. Киселёва О.А., Попова Т.В., Букатова В.Е. Математическая модель системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока при наличии запаздываний по состоянию и управлению. *Электромеханические комплексы и системы управления*. 2010;1: 15-19.
 7. Киселёва О.А., Букатова В.Е., Попова Т.В. Синтез детерминированной дискретной логико-динамической системы с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009;4: 11-14. (официальных ссылок 1)
 8. Киселёва О.А., Попова Т.В., Букатова В.Е. Математическая модель системы управления бесконтактным двигателем постоянного тока при наличии запаздываний по состоянию и управлению. *Электромеханические комплексы и системы управления*. 2010;1: 15-19.
 9. Киселёва О.А., Попова Т.В., Букатова В.Е. Математическая модель управления дискретной системой с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009;3: 43-46.
 10. Киселёва О.А., Попова Т.В., Букатова В.Е. Вопросы синтеза дискретных систем с бесконтактным двигателем постоянного тока. Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. *Межвузовский сборник научных трудов Воронежского государственного технического университета*. Воронеж. 2009: 54-58.
 11. Медведев В.А. Попова Т.В., Киселёва О.А., Киселёв Д.П. Выбор ведущего вектора в системе управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *Энергия – XXI век*. 2016;1(93): 46-52.

REFERENCES

1. Popova T.V., Kiseleva O.A. Accounting for intervals of discreteness of a model of a system with a contactless DC motor. *Intelligent Information Systems*. 2012: 113-114.
2. Kiseleva O.A., Kiselev D.P., Popova T.V. Functions of the current regulator of the control system of a contactless DC motor. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2015;1(8): 7.
3. Kiseleva O.A., Kiselev D.P., Popova T.V. Functions of the current regulator of the control system of a contactless DC motor. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2015;1(8): 7.
4. Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Popova T.V. Ideal vector control of a contactless DC motor. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2017;1(16): 13.
5. Kiseleva O.A., Vinokurov S.A., Popova T.V. Discrete equivalent to ideal vector control of a contactless DC motor. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2017.
6. Kiseleva O.A., Popova T.V., Bukatova V.E. A mathematical model of a control system for a non-contact DC motor in the presence of delays in state and control. *Electromechanical complexes and control systems*. 2010;1: 15-19.

7. Kiseleva O.A., Bukatova V.E., Popova T.V. Synthesis of a deterministic discrete logic-dynamic system with a contactless DC motor. *Electrotechnical complexes and control systems*. 2009;4: 11-14 (official links 1)
8. Kiseleva O.A. Popova T.V., Bukatova V.E. A mathematical model of a control system for a non-contact DC motor in the presence of delays in state and contro. *Electromechanical complexes and control systems*. 2010;1: 15-19.
9. Kiseleva O.A., Popova T.V., Bukatova V.E. The mathematical model of controlling a discrete system with a non-contact DC motor. *Electrotechnical complexes and control systems*. 2009;3: 43-46.
10. Kiseleva O.A., Popova T.V., Bukatova V.E. Issues of synthesis of discrete systems with a contactless DC motor. *Optimization and modeling in automated systems. Interuniversity collection of scientific papers of the Voronezh State Technical University*. Voronezh. 2009: 54-58.
11. Medvedev V.A., Popova T.V., Kiseleva O.A., Kiselev D.P. The choice of the leading vector in the control system of a contactless DC motor / V.D. Medvedev, / *Energy – XXI century*. 2016;1(93): 46-52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Киселёва Ольга Алексеевна, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Olga A. Kiseleva, Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Попова Татьяна Владимировна, доцент Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Tatyana V. Popova, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Тимошкин Артем Юрьевич, студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Artyom Y. Timoshkin, Voronezh State Technical University, graduate student of the Faculty of Energy and Control System, Voronezh, Russian Federation.