

УДК 621.313.292

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.046](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.046)

ЭВОЛЮЦИЯ СОСТОЯНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ ОТ ИМПУЛЬСА К ИМПУЛЬСУ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.А. Винокуров¹, О.А. Киселёва², Н.И. Рубцов³

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

¹*e-mail: stvinokurov@rambler.ru*

²*e-mail: kis.ola@mail.ru*

³*e-mail: nrubcov85@gmail.ru*

Резюме: В работе проводится анализ наблюдателя состояния в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока, считая, что система управления в нем построена как гибридная, которой присуща как дискретная, так и непрерывная динамика. Идеальное векторное управление бесконтактным двигателем постоянного тока можно описать теоретически и использовать его как шаблон для определения отклонений при различных способах управления и оценки их эффективности. В работе приведено сравнение идеального управления с дискретным управлением, показаны возможности реализации непрерывных законов управления за счет смещения управляющих импульсов в пространстве и времени. При импульсном управлении, которое используется в электроприводе в настоящее время, вычисляются не только длительности импульсов, но и расстояния между ними, то есть начало следующего импульса, а главное выбирается ведущий базовый вектор. Наблюдатель состояния в такой системе выполняет сложную роль, особенно при наличии в звеньях системы запаздывания, которые могут нарушить устойчивость синхронного режима двигателя с наблюдателем состояния. В работе приведена структурная схема математической модели наблюдателя состояния с детектором полного оборота.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, наблюдатель состояния, гибридное управление, ведущий базовый вектор.

Для цитирования: Винокуров С.А., Киселёва О.А., Рубцов Н.И. Эволюция состояния наблюдателя от импульса к импульсу в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/VinokurovSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.046

EVOLUTION OF THE OBSERVER STATE FROM PULSE TO PULSE IN AN ELECTRIC DRIVE WITH A CONTACTLESS DC MOTOR

S.A. Vinokurov, O.A. Kiseleva, N.I. Rubtsov

Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation

Abstract: The paper analyzes the current state in an electric drive with a contactless DC motor, considering that the control system in it is built as a hybrid, which is inherent in both discrete and continuous dynamics. The ideal vector control of a contactless DC motor can be described theoretically and used as a template for determining deviations in various control methods and evaluating their effectiveness. The paper compares the ideal control with discrete control, shows the possibility of implementing continuous control laws due to the displacement of control pulses in space and time. With pulse control, which is used in the electric drive at the present time, not only the pulse durations are calculated, but also the distances between them, that is, the beginning of the next pulse, and most importantly, the leading base vector is selected. The state observer in such a system performs a complex

role, since there are delays in the system links, that must be considered, since they can disrupt the stability of the synchronous mode of the engine with the state observer. The paper presents a block diagram of a mathematical model of a state observer with a full-revolution detector.

Keywords: contactless DC motor, state observer, hybrid control, leading base vector.

For citation: Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Rubtsov N.I. Evolution of the observer state from pulse to pulse in an electric drive with a contactless dc motor. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/VinokurovSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.046 (In Russ.).

Введение

В электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) в качестве исполнительного двигателя используется синхронный двигатель с постоянными магнитами определенной конструкции. Для его управления в идеальном режиме необходимо создать непрерывное круговое вращающееся поле с изменяющейся амплитудой $\alpha_{\theta, \omega}$, частотой $\omega_{\alpha, \theta}$ и фазой $\theta_{\alpha, \omega}$.

Идеальным векторным управлением будем считать такое, когда в поле статора формируется круговое вращающееся поле, в котором могут варьироваться все три координаты: амплитуда, частоты и фаза [1- 3].

Разработка дискретных методов управления БДПТ с наблюдателями состояния, которые обеспечивают характеристики близкие к идеальным характеристикам, является одной из актуальных задач в электроприводе.

Целью настоящего исследования является анализ дискретного управления БДПТ в электроприводе с позиции эволюции состояния наблюдателя от импульса к импульсу.

Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

- представить систему управления БДПТ как гибридную, которой присуща как дискретная, так и непрерывная динамика;
- провести сравнение идеальной системы управления с дискретной;
- исследовать влияние эволюции состояния наблюдателя от импульса к импульсу;
- разработать структурную схему математической модели наблюдателя состояния с детектором полного оборота.

Материалы и методы

Рассмотрим случаи идеального управления и сравним его с возможностью реализации при импульсном управлении:

- по амплитуде напряжения $\alpha_{\theta, \omega}$ – дискретный эквивалент за счет изменения относительной длительности импульса;
- по углу между полем статора и ротора $\theta_{\alpha, \omega}$ – дискретный эквивалент можно получить, заменив пространственную величину временной, то есть сформировать импульс раньше или позже, что даст возможность за этот промежуток времени переместиться ротору на рассчитанный угол;
- по частоте питающего напряжения $\omega_{\alpha, \theta}$ – дискретный эквивалент можно получить путём изменения порядка переключения «плюсовых» и «минусовых» силовых элементов инвертора;

- по амплитуде питающего напряжения и углу между полем ротора и статора при постоянстве частоты $\alpha \Theta_\omega$ – дискретный эквивалент можно получить за счет изменения относительной длительности импульса и момента начала импульса;

- по частоте и углу между полем ротора и статора при постоянной амплитуде напряжения $\omega \Theta_\alpha$ – дискретный эквивалент можно получить за счет влияния на начало импульса и последовательность коммутации силовых ключей;

- по частоте питающего напряжения при поддержке угла $\Theta = const \alpha \omega_\theta$ и амплитуде – дискретный эквивалент можно получить за счет изменения относительной длительности импульса и изменения последовательности коммутации силовых ключей;

- управление по всем трем координатам $\alpha \Theta \omega$, возможно обеспечить дискретно, но в этом случае будут управляемыми координаты начала и окончания каждого импульса и законы коммутации силовых ключей.

В обозначении переменного параметра индекс указывает на постоянную координату.

Управление по всем трём координатам $\alpha_{\alpha,\omega}$, $\omega_{\alpha,\theta}$, $\Theta_{\alpha,\omega}$ возможно осуществить дискретно, но для этого необходимо сформировать управляющую функцию, получив информацию от наблюдателя состояния.

Напряжение, которое подключается к двигателю, формируется инвертором, оно импульсное, а сигнал, снимаемый с выхода электропривода – непрерывный, отсюда следует, что наблюдатель состояния должен сформировать информацию для управления, и в конечном итоге определить и подключить базовый управляющий вектор, определить его положение в пространстве, начало и окончание импульса.

Каждый следующий импульс в векторном управлении будет формироваться по следующим правилам [4 - 6]:

- определение пространственного положения базового вектора, то есть выбор одного из нескольких базовых векторов, который наиболее удовлетворяет по значению коэффициента эффективности;

- базовый управляющий вектор может быть нулевой, то есть он определен в пространстве, но на нем еще не формируется импульс напряжения;

- определяется временное значение начала импульса в базовом управляющем векторе;

- определяется временное значение окончания импульса в этом векторе.

Следует отметить, что при векторном управлении не обязательно, что бы каждый новый импульс формировался на новом базовом импульсе. В каждом случае необходимо учитывать ненулевые начальные условия, это связано с тем, что обмотки двигателя являются на двигатель активно-индуктивной нагрузкой и подчиняются первому закону коммутации.

Отсюда следует, что наблюдатель состояния должен восстановить дискретное состояние (следующий импульс) по непрерывному выходному сигналу, например, потребляемому току [7 - 8].

Работу по созданию управляющего импульса выполняет инвертор, интеллектуальный модуль, которому приходится решать не только вопрос управления, но и защиты (перегрева, перенапряжения и т. д.), задачи рекуперации энергии и устойчивой работы.

Результаты и их обсуждение

При работе наблюдателя состояния в электроприводе с БДПТ одной из основных задач является синхронизация дискретных последовательностей. Рассмотрим

синхронный режим наблюдения дискретных последовательностей в наблюдателе состояния, инверторе и исполнительном устройстве системы.

Для системы с БДПТ при наличии запаздывания, как в наблюдателе, так и в самой системе уравнение будет иметь вид

$$\dot{x}(t) = Ax(t); \quad (1)$$

$$A = A_0 + A_1 e^{-A_0 \tau}; \quad (2)$$

$$z(t) = Bx(t); \quad (3)$$

$$B = B_0 e^{-A \tau} e^{A_0 \tau}; \quad (4)$$

$$y(t) = Lx(t); \quad (5)$$

$$t_{n+1} = t_n + T_n; \quad (6)$$

$$x(t_n^+) = x(t_n^-) + \beta_n C; \quad (7)$$

$$T_n = f(z(t_n)); \quad (8)$$

$$\beta_n = F(z(t_n)); \quad (9)$$

где, $Z(t)$ – сигнал, на базе которого формируются моменты времени включения и выключения управляющих импульсов напряжения инвертором.

Обозначим значение функции состояния в начале импульса $x(t^-)$ и в конце $x(t^+)$, тогда

$$x(t_n^+) = x(t_n^-) + \beta_n C,$$

где $t_{n+1} = t_n + T_n$;

β_n – величина, характеризующая дискрету управления.

Система управления БДПТ с наблюдателем состояния и запаздыванием на промежутке времени

$$t_n + \tau \leq t \leq t_{n+1}; \quad (10)$$

Будет иметь решение такое же, как в системе без запаздывания при одинаковых начальных условиях. Моменты начала формирования импульсов в этом случае принадлежат совпадающим интервалам. Отсюда следует, что можно построить наблюдатель состояния для получения оценок $(\hat{t}_n, \hat{\beta}_n)$, основанный на аппроксимации модели, описанной уравнениями (1) – (9), как без запаздывания, т. е. при $\tau=0$, то есть считая $A=A_0$ и $B=B_0$.

Рассмотрим применение наблюдателя состояния с пропорциональной обратной связью в дискретной части, уравнения его будет иметь вид

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + M(y(t) - \hat{y}(t)); \quad (11)$$

$$\hat{y}(t) = D\hat{x}(t); \quad (12)$$

$$\hat{z}(t) = B\hat{x}(t); \quad (13)$$

$$x(t_n^+) = \hat{x}(t_n^- + \hat{\beta}_n C); \quad (14)$$

$$t_{n+1} = t_n + T_n; \quad (15)$$

$$T_n = \Phi(\hat{z}(\hat{t}_n)); \quad (16)$$

$$M(t) = 0, \quad t_n < t < t_n + \tau; \quad (17)$$

$$M(t) = M, \quad t_n + \tau \leq t \leq t_{n+1}; \quad (18)$$

где M – матрица коэффициентов усиления в непрерывной части.

Коррекция сигнала проводится только в непрерывной части, а если коррекция происходит как в непрерывной, так и дискретной части, то это приводит к сокращению времени переходного процесса.

Элементы векторов $\hat{z}(t)$ и $\hat{y}(t)$ могут иметь скачки. Величина M на промежутке $t_n + \tau \leq t \leq t_{n+1}$ постоянна и равна $M = \text{const}$, она выбирается так, чтобы синхронный режим наблюдателя (11) – (18) по отношению к решению $(x(t), t_n)$ для БДПТ был асимптотически устойчив в малом.

Эволюцию состояния наблюдателя от импульса к импульсу можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(t_n^-) \\ \hat{t}_n \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \hat{x}(t_{n+1}^-) \\ \hat{t}_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Точечное отображение при $n \geq 1$ задается уравнениями

$$\widehat{x}_{n+1} = P(\widehat{x}_n, \widehat{t}_n), \quad (20)$$

$$\widehat{t}_{n+1} = \widehat{t}_n + \Phi(\beta(\widehat{x}_n, \widehat{t}_n)).$$

Электромеханические свойства БДПТ в наблюдателе состояний можно описать уравнениями электродинамики:

$$\begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_\alpha - \frac{1}{L} \cdot e_\alpha + \frac{1}{L} \cdot u_\alpha; \\ \frac{di_\beta}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i_\beta - \frac{1}{L} \cdot e_\beta + \frac{1}{L} \cdot u_\beta, \end{aligned} \quad (21)$$

где R – сопротивление статора;

L – индуктивность статора;

i_α, i_β – электрические токи статора в 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 .

На Рисунке 1 приведена структурная схема математической модели наблюдателя состояний с вычислением скорости по реальному дифференциатору от скорости, а на Рисунке 2 – структурная схема математической модели детектора полного оборота.

Для обеспечения непрерывной формы графика угла поворота ротора $\theta(t)$ в контур наблюдателя состояния вводится подсистема детектора полного оборота. Детектор полного оборота, реагирует на скачкообразные изменения функции $\theta(t)$ и формирует на выходе значение угла ($2\pi, 4\pi \dots 2n\pi$), которое будет кратным количеству

полных оборотов n совершенных ротором с момента начала наблюдения. Графики зависимости угла поворота ротора в схеме с детектором поворота и без него приведены на Рисунке 3.

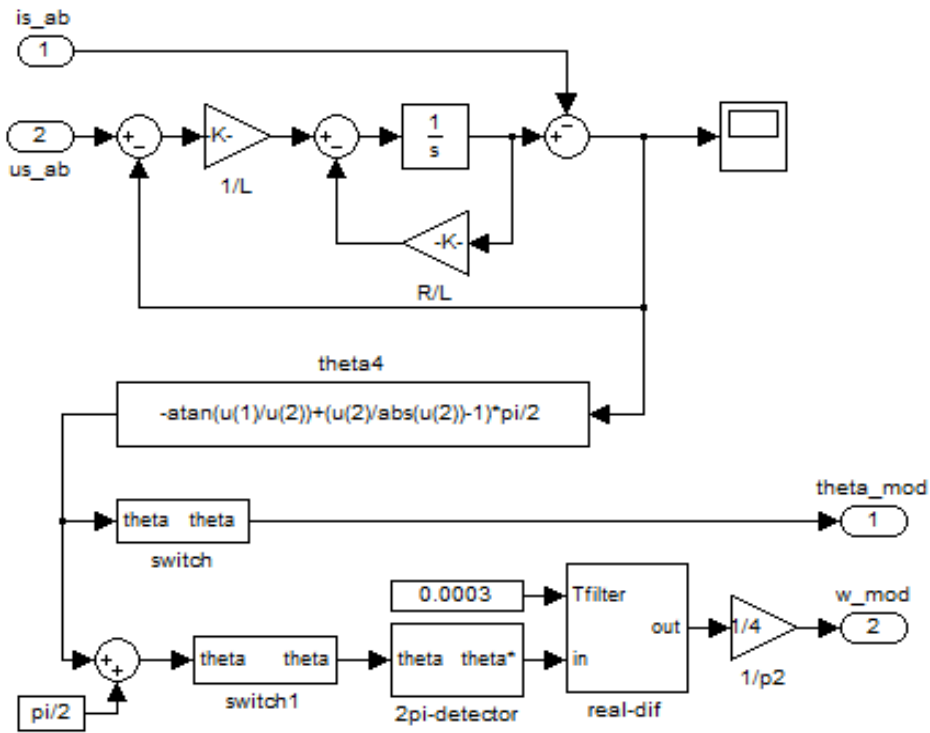


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели наблюдателя в БДПТ
 Figure 1 – Structural diagram of the mathematical model of the observer in the BJT

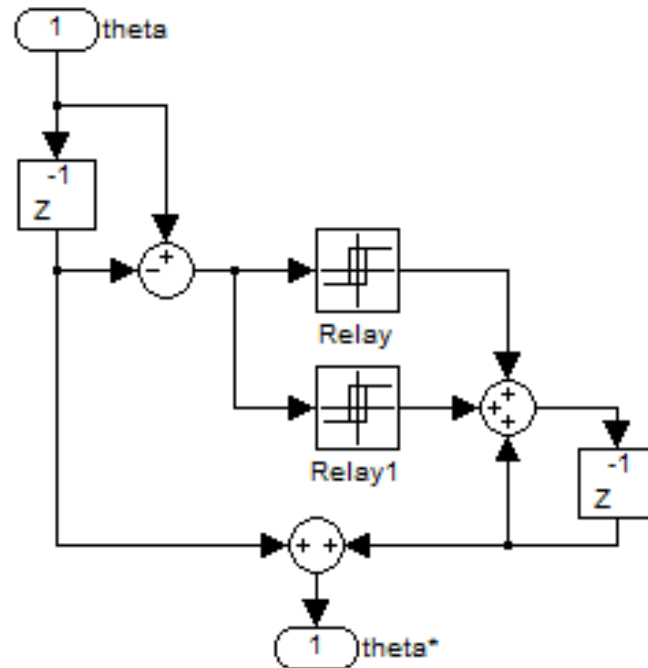


Рисунок 2 – Структурная схема математической модели детектора полного оборота
 Figure 2 – Structural diagram of the mathematical model of a full revolution detector

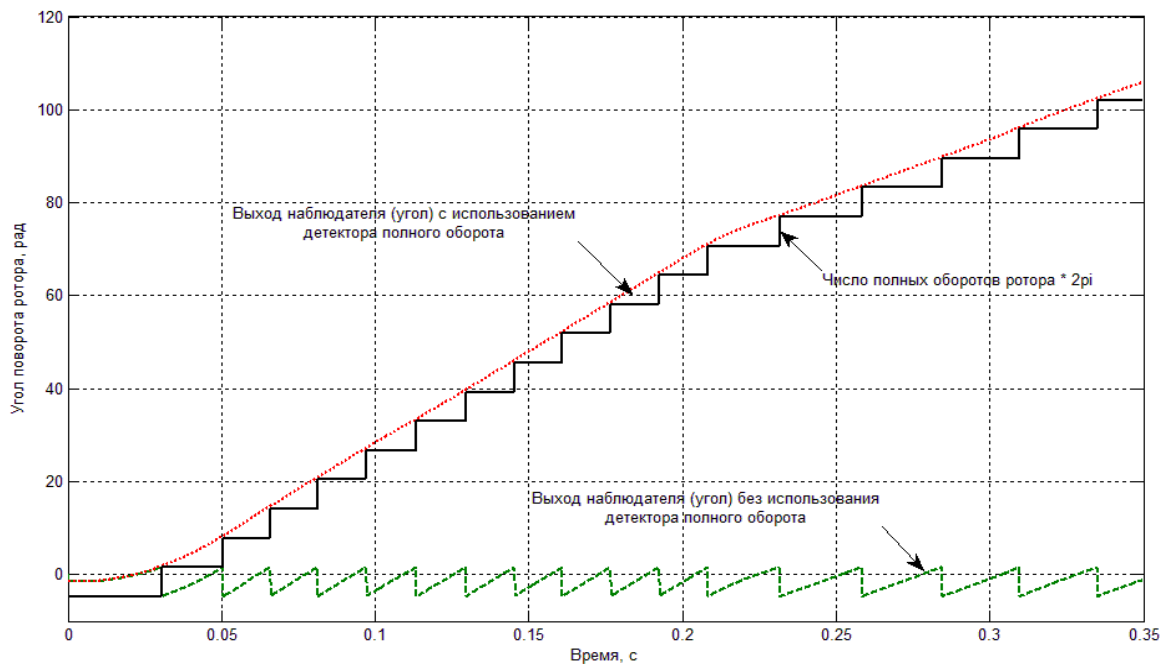


Рисунок 3 – Графики угла поворота ротора в системе с наблюдателем состояния с детектором полного оборота и без использования детектора
Figure 3 – Graphs of the angle of rotation of the rotor in a system with a state observer with a full revolution detector and without using a detector

Алгоритм, по которому обрабатывает входные сигналы наблюдатель состояния, должны учитывать запрещенные состояния, а так же учитывать запаздывания, создаваемые в системе управления при преобразовании аналогового сигнала в импульсный сигнал. Проблема применения наблюдателя состояния заключается в том, что рабочие вектора – это вектора тока, они в большинстве случаев непрерывны во времени, а изменяются только в пространстве, а управляющие вектора – это импульсные вектора напряжения. При построении цифровой системы управления необходимо решать проблему накопления вычисляемой ошибки регулирования из-за большого числа математических операций [9-11]. На Рисунке 4 показаны графики отработки сигнала задания выходной координатой (угловой скоростью) в функции времени в системе с детектором полного оборота без детектора.

На Рисунке 5 приведены графики скорости и нагрузки, полученные в результате моделирования электропривода с наблюдателем состояния при адаптивной настройке параметров пропорционально-интегрального регулятора скорости.

При построении графиков рассматривался различный подход к формированию алгоритма наблюдателя состояния.

Как видно из графиков, приведенных на рисунках 4 и 5, системы электропривода на базе БДПТ с наблюдателями состояния могут обеспечить требуемые характеристики выходных величин, в данном случае приведены графические зависимости скорости вращения от времени.

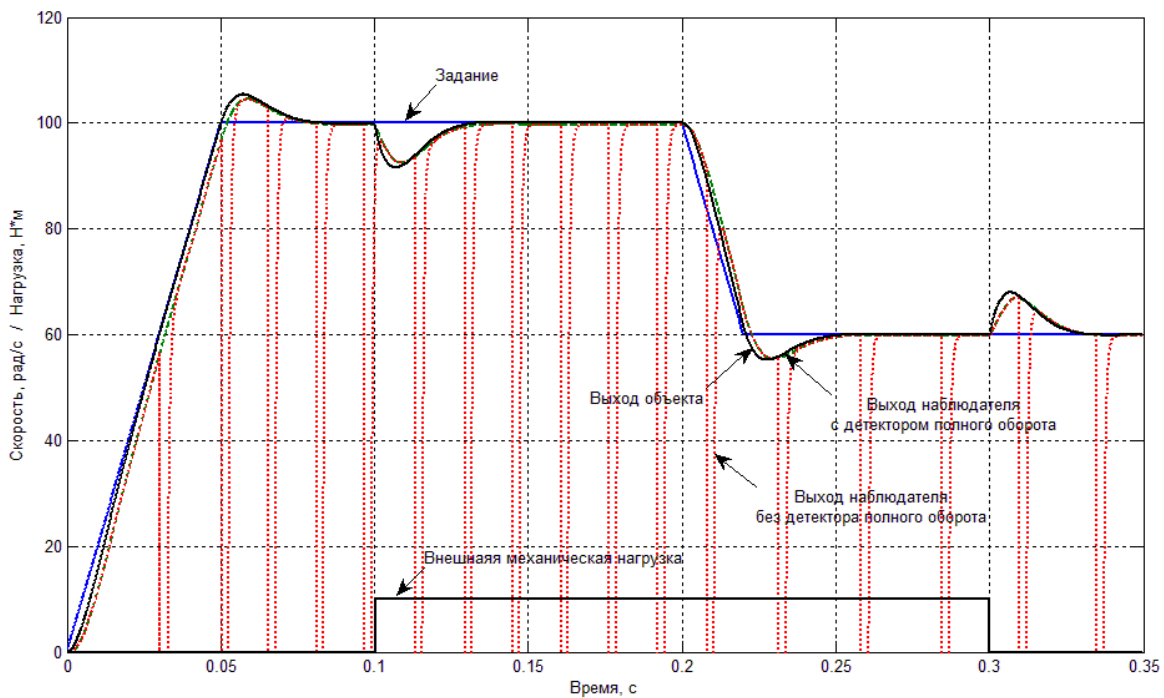


Рисунок 4 – Графики отработки сигнала задания выходной координатой (угловой скоростью) в функции времени в системе с детектором полного оборота без детектора

Figure 4 – Graphs of working out the signal of the task by the output coordinate (angular velocity) as a function of time in a system with a full revolution detector without a detector

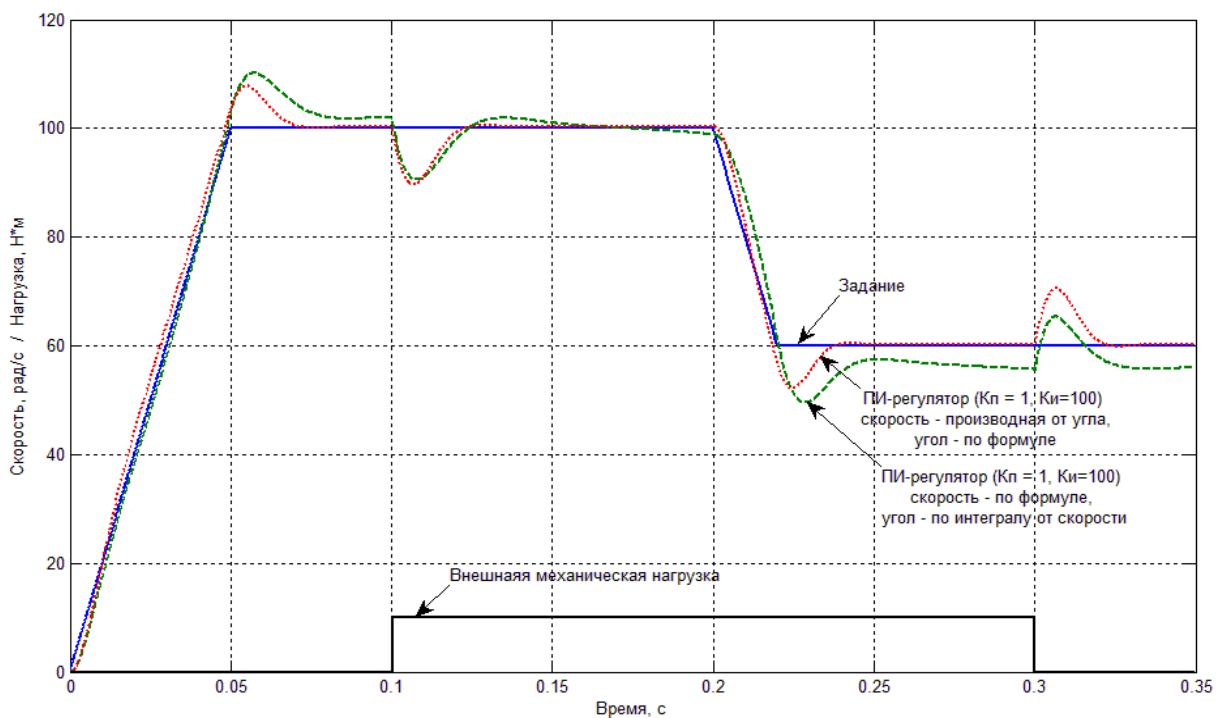


Рисунок 5 – Результаты моделирования при замыкании системы управления по наблюдателям состояний

Figure 5 – Simulation results for the closure of the control system by state observers

Заключение

В представленной статье рассмотрены вопросы дискретного управления БДПТ в электроприводе с позиции эволюции состояния наблюдателя от импульса к импульсу. Система управления БДПТ анализировалась как гибридная, которой присуща как дискретная, так и непрерывная динамика процессов.

Разработана структурная схема математической модели наблюдателя состояния с детектором полного оборота.

Показано, что системы с наблюдателями состояния имеют преимущества в тех случаях, когда датчики скорости и датчики положения ротора могут повлиять на надежность системы или оказаться не работоспособными в данной окружающей среде. Применение наблюдателей состояния уменьшает число соединительных проводов, что снижает влияние электромагнитных помех на информационные каналы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров С.А., Киселёва О.А., Букатова В.Е. Адаптивная идентификация электромеханических систем с бесконтактными двигателями постоянного тока. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2007;3(5):99-102.
2. Винокуров С.А., Киселёва О.А., Букатова В.Е. Дискретно-непрерывные системы управления в электроприводах с бесконтактными двигателями постоянного тока. *Системы управления и информационные технологии*. 2009;35(1.1):205-208.
3. 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.
4. Винокуров С.А., Киселёва О.А., Букатова В.Е. Методология синтеза электромеханических систем с бесконтактным двигателем постоянного тока с накоплением информации о состоянии. *Системы управления и информационные технологии*. 2008;34(4.1):153-156.
5. Киселёв Д.П., Киселёва О.А. Моделирование адаптивного управления в электромеханической системе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2014;3(6):1.
6. Киселёв Д.П., Федосова И.С., Киселёва О.А. Формирование управляющих импульсов бесконтактного двигателя постоянного тока в пусковом режиме. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2015;4(11):3.
7. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Букатова В.Е. Исследование электроприводов с бесконтактными двигателями постоянного тока с позиции методологии логико-динамических систем. *Системы управления и информационные технологии*. 2008;33(3):89-93.
8. Киселёва О.А., Киселёв Д.П. Моделирование наблюдателя состояния в электромеханической системе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2014;3:4.
9. 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.
10. Федосова И.С., Киселёв Д.П., Киселёва О.А. Схемы замещения бесконтактного двигателя постоянного тока при формировании базового вектора. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2015;4(11):5.
11. Киселёва О.А., Романов А.В., Киселёв Д.П. Математическая модель системы

управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2015;1(8):3.

REFERENCES

1. Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Bukatova V.E. Adaptive identification of electromechanical systems with non-contact DC motors. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2007;3(5):99-102.
2. Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Bukatova V.E. Discrete-continuous control systems in electric drives with non-contact DC motors. *Control Systems and Information Technologies*. 2009;35(1.1):205-208.
3. 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.
4. Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Bukatova V.E. The methodology for the synthesis of electromechanical systems with a contactless DC motor with the accumulation of status information. *Control Systems and Information Technologies*. 2008;34(4.1):153-156.
5. Kiselev D.P., Kiseleva O.A. Modeling adaptive control in an electromechanical system. *Modeling, optimization and information technology*. 2014;3(6):1.
6. Kiselev D.P., Fedosova I.S., Kiseleva O.A. The formation of control pulses of a contactless DC motor in starting mode. *Modeling, optimization and information technology*. 2015;4(11):3.
7. Kiseleva O.A., Vinokurov S.A., Bukatova V.E. Research of electric drives with non-contact DC motors from the position of the methodology of logical-dynamic systems. *Control Systems and Information Technologies*. 2008;33(3):89-93.
8. Kiseleva O.A., Kiselev D.P. Modeling a state observer in an electromechanical system based on a contactless DC motor. *Modeling, optimization and information technology*. 2014;3:4.
9. 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 Technology*, 2015;1(8):7.
10. Fedosova I.S., Kiselev D.P., Kiseleva O.A. The equivalent circuit of a contactless DC motor during the formation of the base vector. *Modeling, optimization and information technology*. 2015;4(11):5.
11. Kiseleva O.A., Romanov A.V., Kiselev D.P. A mathematical model of a control system for a contactless DC motor. *Modeling, optimization and information technology*. 2015;1(8):3.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Винокуров Станислав Анатольевич, к. т. н, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Stanislav A. Vinokurov, Associate Professor, Voronezh State Technical University, candidate of technical sciences, Voronezh, Russian Federation.

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

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

Рубцов Николай Игоревич, студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Nikolay I. Rubtsov, graduate student of the Faculty of Energy and Control Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.