

УДК 621.313.292

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.016)

## Локально-оптимальное управление в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока

О.А. Киселёва, С.А. Винокуров, Д.Д. Киселёва

*Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, Российская Федерация*

**Резюме.** В работе проводится анализ возможности локально-оптимального управления в электромеханической системе на базе бесконтактного двигателя постоянного тока, который позволяет определить требуемые параметры импульса напряжения не только в регулируемом сигнальном секторе, но и в следующем секторе при переключении базовых векторов в процессе регулирования. Управление выходной координатой (состоянием системы) происходит за счет переключения базовых векторов и пульсации каждого импульса времени. Процессы управления пульсациями базового вектора (широотно-импульсная модуляция) аналогичны для каждого вектора, только эти вектора могут быть смещены в пространстве на определенный угол. Угол смещения данных векторов обратно пропорционален произведению числа пар полюсов и фаз. Процессы пульсации становятся периодическими, причем происходит чередование базового вектора и нулевого. В зависимости от частоты вращения ротора и периода пульсаций, число пульсаций одного базового вектора (без переключения его в пространстве) может достигать нескольких десятков. Если считать, что процессы, которые протекают при переключении только базовых векторов, идентичны по всем параметрам, кроме расположения в пространстве, то при расчете можно перемещать начало координат в новую точку пространства (расположение базового вектора) и получать периодические процессы для создания электромагнитного момента. Для синтеза алгоритма управления электромеханической системой с бесконтактным двигателем постоянного тока можно использовать метод прогнозирующего управления – Model predictive control (MPC). Целью данного исследования является оценка возможности применения локально-оптимального управления при каждом переключении базовых векторов с учетом особенностей построения бесконтактного двигателя постоянного тока. Оно направлено на формирование управляемых параметров одного базового вектора в сочетании с нулевым вектором, который определен как пространственно, так и начальными условиями исходным базовым вектором. Показано, что состояние системы будет зависеть также от скорости рассеивания в нулевом векторе накопленной электромагнитной энергии за время существования базового вектора.

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель постоянного тока, электромеханическая система, система управления, процесс коммутации, локально-оптимальное управление, наблюдатели состояния, базовый и нулевой вектора.

**Для цитирования:** Киселёва О.А., Винокуров С.А., Киселёва Д.Д. Локально-оптимальное управление в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=916> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.016

## Local-optimal control in an electromechanical system with a contactless DC motor

O.A. Kiseleva, S.A. Vinokurov, D.D. Kiseleva

*Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russian Federation*

**Abstract:** The paper analyses the possibility of local-optimal control in an electromechanical system based on a contactless DC motor, which allows the required voltage pulse parameters to be determined, not only in the regulated signal sector but also in the next sector during the switching of the base vectors of the control process. The output coordinate (system state) control is accounted for by the reference vectors switching and each time pulse ripple. The base vector pulsation control processes (pulse width modulation) are similar for each vector. Only these vectors can be shifted in space by a certain angle. The angle at which these vectors are shifted is inversely proportional to the product of the number of pole and phase pairs. The pulsation processes become periodic, with the base vector and zero vector alternating. Depending on rotor speed and pulsation period, the number of pulsations of one base vector (without switching it in space) can reach several dozens. Providing that processes occurring at switching of base vectors only are identical in all parameters except for location in space, we can move the origin of coordinates to a new position (location of the base vector) and get periodical processes for the creation of electromagnetic momentum during calculation. To synthesize an electromechanical control system with a contactless DC engine, you can use the predictive control method - Model predictive control (MPC). The purpose of this study is to assess the feasibility of locally optimal control every time the base vectors are switched, considering the features of building a DC contactless engine. Aimed at forming the controlled parameters of one base vector combined with a zero vector, which is defined by both spatial and initial conditions of the original base vector. It is demonstrated that the system status will also depend on the rate of dispersal in the zero vector of accumulated electromagnetic energy during the existence of the base vector control in an electromechanical system with a contactless DC motor.

**Keywords:** contactless DC motor, electromechanical system, control system, commutation process, local-optimal control, state observers, base and zero vector.

**For citation:** Kiseleva O.A., Vinokurov S.A., Kiseleva D.D. Local-optimal control in an electromechanical system with a contactless DC motor. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=916> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.016 (In Russ).

## Введение

Для управления бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ) в электромеханической системе (ЭМС) чаще всего используют векторный метод. Пульсации электромагнитного момента, возникающие в БДПТ, компенсируются за счет оптимизации конструкции исполнительного двигателя и использования, в каждом конкретном случае, модификации векторного управления, которое приводит к снижению этих пульсаций. Оптимизация конструкции двигателя осуществляется за счет применения специальных обмоток, профилирования постоянных магнитов, скоса пазов и сдвига магнитов. Она является эффективной для уменьшения пульсаций, но приводит так же к уменьшению электромагнитного момента и усложнению конструкции машины.

Получить информацию о пульсациях электромагнитного момента, которые приводят к нестабильности мгновенной скорости вращения в ЭМС, можно с помощью наблюдателя состояния или датчика положения ротора двигателя. Обеспечение оптимального векторного управления БДПТ с минимальными пульсациями мгновенной скорости является сложной и трудоемкой задачей.

Применение локально-оптимального управления в ЭМС на базе БДПТ позволит решить вопросы, связанные не только с качеством управления выходной координатой, но и решить вопрос управляемости в более широком диапазоне. Анализ возможности локально-оптимального управления в ЭМС на базе БДПТ показал, что можно выделить и оценить по управляемости параметры базового импульса, на которые необходимо воздействовать в процессе регулирования [1,2].

Управление состоянием системы с БДПТ осуществляется за счет переключения базовых векторов напряжения и их пульсации времени. Пульсирующим базовым

вектором будем считать совокупность базового вектора в виде импульса определенной длительности с заданной амплитудой, равной постоянному напряжению питания силового инвертора, и нулевого импульса с тем же пространственным положением. Процессы управления пульсирующими базовыми векторами аналогичны, только эти вектора могут быть смещены в пространстве на определенный угол, который обратно пропорционален произведению числа пар полюсов и фаз.

Целью исследования, проведенного в данной работе, является оценка возможности применения локально-оптимального управления при каждом переключении базовых векторов с учетом построения ЭМС с БДПТ.

Процессы, протекающие в БДПТ, становятся периодическими, причем всегда происходит чередование базового вектора и нулевого. В зависимости от частоты вращения ротора и периода пульсаций, число пульсаций одного базового вектора (без переключения его в пространстве) может достигать нескольких десятков.

Новизной исследования является возможность формирования оптимальной функции только в одном сигнальном секторе (за время перехода от одного базового вектора к другому) и использования этой функции в других сигнальных секторах в силу периодичности процессов и идентичности формирования базовых векторов, кроме расположения их в пространстве.

### **Синтез локально-оптимальных электромеханических систем с БДПТ**

Для синтеза алгоритма управления ЭМС с БДПТ можно использовать метод прогнозирующего управления – Model predictive control. Этот метод содержит много подходов и алгоритмов, но во всех из них управляющее воздействие вычисляется за счет оптимизации целевой функции, причем в реальном времени, при использовании модели объекта управления. Для ЭМС на базе БДПТ наибольший интерес представляет частный случай этого метода – прогнозом на один такт (переход от одного базового вектора к другому) и оптимизация локальных критериев внутри каждого такта [3,4]. Этот случай необходимо рассматривать с позиции определения управляемых параметров одного пульсирующего базового импульса в сочетании с нулевым импульсом, который пространственно задан положением пульсирующего вектора, а так же начальными условиями, сформированными базовым вектором [5-8].

Рассмотрим формирования пульсирующего управляющего импульса в базовом векторе, для этого необходимо определить:

- положение базового вектора в пространстве и сформировать управляющие сигналы для инвертора на открывание определенных силовых ключей;
- временное начало импульса, так как он может быть не первым в этом базовом векторе;
- длительность импульса (время окончания импульса) и момент перехода его в нулевой импульс;
- длительность нулевого импульса, так как суммы времени существования управляющего и нулевого импульса равна периоду модулирующей частоты;
- контур для протекания тока в нулевом импульсе, так как он может повлиять на скорость переходных электромагнитных переходных процессов в этот промежуток времени.

Кроме этого система управления БДПТ должна обеспечивать требуемое быстродействие, заданную полосу пропускания, определенную точность отработки управляющих сигналов. Все эти параметры, которые должна обеспечить система управления в электроприводе, связаны с весом, габаритами и стоимостью.

Системы управления электроприводов БДПТ по способу достижения цели управления можно разделить на системы с параметрической и сигнальной адаптацией. В системах с сигнальной адаптацией не изменяются параметры управляющего устройства, а к управляющему воздействию добавляется дополнительный сигнал адаптации. Такие системы управления проще реализуются, если ограничен диапазон изменения параметров БДПТ [9].

В системах с параметрической адаптацией цель управления достигается за счет изменения параметров управляющего устройства с помощью модифицированного регулятора. Такие системы имеют более сложную структуру, но они более универсальны. Сложность процесса адаптации зависит от числа настраиваемых параметров [10].

Для повышения точности обработки управляющих сигналов и увеличения быстродействия процесса адаптации в системах управления БДПТ применяют алгоритмы, в которых сочетаются методы параметрической и сигнальной адаптации. Параметрическая адаптация служит для настройки коэффициента усиления в заданных пределах. Сигнальная адаптация строится по принципу релейного алгоритма и обеспечивает высокое быстродействие, она в свою очередь позволяет уменьшить число перенастраиваемых параметров. Сигнально-параметрическая система управления БДПТ обладает простотой реализации, сохраняет свою работоспособность при координатных возмущениях, но переходные процессы могут носить колебательный характер.

Отказ от электромеханических датчиков скорости и угла поворота в системах управления БДПТ ведет к неполному измерению вектора состояния электродвигателя. Задача восстановления вектора состояния в основном решается устройствами асимптотической оценки (наблюдателями состояний) или методами динамической компенсации. Такие методы требуют информацию о параметрах и структуре электродвигателя [11-13].

Чаще всего в системах управления БДПТ по информации с датчиков скорости и угла поворота, на основе знания законов получения реакций, формируется команда на управление. При неполной информации управление может оказаться менее эффективным. Для дискретной системы алгоритм выработки управляющих воздействий будет зависеть от значений измеряемых выходных координат и заданных возмущений, взятых в дискретных точках с заданным периодом. При неполной информации приходится решать задачу обобщенной идентификации [14].

Нахождение оптимального управления в системе с неполной обратной связью на базе БДПТ можно осуществить по математической модели, если её поведение описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x(t), u(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где  $X$  - вектор состояния системы,

$$x = (x^1, x^2)^T \in R^n, x^1 = (x_1, \dots, x_m)^T, \quad x^2 = (x_{m+1}, \dots, x_n)^T, 0 \leq m \leq n$$

Рассмотрим вариант, когда о компонентах вектора  $x^1 \in R^m$  известна текущая информация, о компонентах вектора  $x^2 \in R^{n-m}$  она отсутствует;

$u$  - вектор управления,  $u \in U \subseteq R^q$ ,  $U$  - заданное множество;

$t$  - время,

$$t \in T' = [t_0, t_1] = T \cup \{t_0\} \cup \{t_1\},$$

$T'$  — промежуток времени функционирования системы управления, моменты времени  $t_0$  и  $t_1$  заданы, внешние воздействия на объект управления отсутствуют;

$f(t, x, u) : T' \times R^n \times U \rightarrow R^n$  - непрерывно дифференцируемая вектор-функция.

Введем обозначения:

$$B = R^n, B_1 = R^m, B_2 = R^{n-m};$$

$$Q = (t_0, t_1) \times R^n, Q' = [t_0, t_1] \times R^n.$$

Начальные условия  $x(t_0)$  заданы множеством  $\Omega \subseteq R^n$ , размерность которого равна  $m$ , то есть

$$x(t_0) \in \Omega = \{x/x^2 = y_0(x^1), x^1 \in R^m = B_1\}, \quad (2)$$

где  $y_{0j}(x^1), j = m+1, \dots, n$ , - заданные непрерывно дифференцируемые функции;  
 $0 \leq m \leq n$ .

При  $m = 0$  множество  $\Omega$  является точкой, а при  $m=n$  совпадает с множеством  $R^n$ . Условия на вектор состояния на правом конце промежутка времени  $T'$  не заданы.

Предполагается, что при управлении используется информация только о времени  $t$  и о компонентах вектора  $x^1$ , т.е. управление  $u(t)$ , применяемое в каждый момент времени  $t \in T'$ , имеет вид управления

$$u(t) = u(t, x^1(t))$$

с неполной обратной связью по вектору состояния.

Множество допустимых управлений  $U_m$  с неполной обратной связью образуют функции  $u(t, x^1) : T' \times B_1 \rightarrow U$  такие, что функции

$$f_i(t, x, u(t, x^1)), i = 1, \dots, n,$$

определены на  $Q'$ , непрерывны вместе с частными производными по  $x$ , кусочно-непрерывны по  $t$ .

При этом управление

$$u(t) = u(t, x^{-1}(t))$$

кусочно-непрерывно по  $t$ , а в точках разрыва значение управления определяется как предел справа.

Определим множество допустимых процессов  $D(t_0, x_0)$  как множество пар  $d = (x(\cdot), u(\cdot))$ , удовлетворяющих уравнению (1) с начальным условием (2) почти всюду на  $T'$ , где  $\forall t \in T', x(t) \in R^n, u(t) \in U$ , функции  $x(\cdot)$  непрерывны и кусочно-дифференцируемы, а  $u(\cdot)$  кусочно-непрерывны.

На множестве  $D(t_0, x_0)$  определим функционал качества управления

$$I(d) = \int_{t_0}^{t_1} f^0(t, x(t), u(t)) dt + F(x(t_1)), \quad (3)$$

где  $f^0(t, x(t), u(t)), F(x(t_1))$  - заданные непрерывно дифференцируемые функции.

Требуется найти такую оптимально синтезирующую функцию на множестве  $\Omega$   $u^*(t, x^1) \in U_m$ , что

$$I(d^*) = \min_{d \in D(t_0, x_0)} I(d) \quad \forall x_0 \in \Omega \quad (4)$$

где  $d^* = (x^*(\cdot), u^*(\cdot) = u^*(\cdot, x^{1*}, (\cdot)))$ .

Для каждого начального условия из множества  $\Omega$  она порождает оптимальную пару, то есть оптимальную траекторию  $x^*(\cdot)$  и оптимальное программное управление  $u^*(\cdot)$ . Предполагается, что минимум  $I(d^*)$  и функция  $u^*(t, x^1)$  существуют.

### Результаты и их обсуждения

Проведенный анализ ЭМС, построенных на базе электропривода с неполной обратной связью и исполнительным элементом БДПТ, показал, что такие системы можно реализовать с требуемыми параметрами качества при использовании микропроцессорного управления с наблюдателями состояний [15-18]. Оптимальное сочетание устройств, обеспечивающих квантования, как по уровню, так и по времени, открывает дополнительные возможности повышения устойчивости таких систем, диагностирования различных точек наблюдаемости, как прямыми, так и косвенными методами.

Разработка наблюдателя состояния строится на основе математической модели БДПТ. При использовании упрощенной математической модели необходимо найти условия осуществимости замены исходной модели упрощенной моделью и оценкой точности получаемых результатов анализа и синтеза на основе упрощенной модели.

Практический способ проверки эффективности упрощенной модели – это сравнение и численная оценка реакций БДПТ и математической модели, полученная при подаче на их входы одинаковых сигналов.

При локальной оптимизации необходимо учитывать влияние одного пульсирующего импульса на систему, то есть возможность реакции система на этот импульс. Это связано с тем, что длительность импульса будет мала для чувствительности системы с заданным моментом нагрузки на валу БДПТ. Кроме этого, каждый импульс напряжения как бы модулируется по амплитуде.

Несмотря на то, что источник напряжения постоянный, в обмотках двигателя наводится противоэдс, которая направлена встречно приложенному напряжению, и зависит от частоты вращения, а разность между ними формирует ток. Причем ЭДС непрерывная и чаще всего изменяется по синусоидальному закону, а это говорит о том, что она присутствует в нулевом векторе.

Используя уравнения (1–4) можно провести оптимизации системы, но целью данного исследования является локальная оптимизация для одного пульсирующего импульса. В процессе управления наиболее важным для системы является ток, протекающий в секциях и создающий электромагнитный момент.

На Рисунке 1 приведена структурная схема математической модели ЭМС на базе БДПТ с наблюдателем состояния.

На Рисунке 2 приведена зависимость угла поворота ротора БДПТ с выхода наблюдателя состояния.

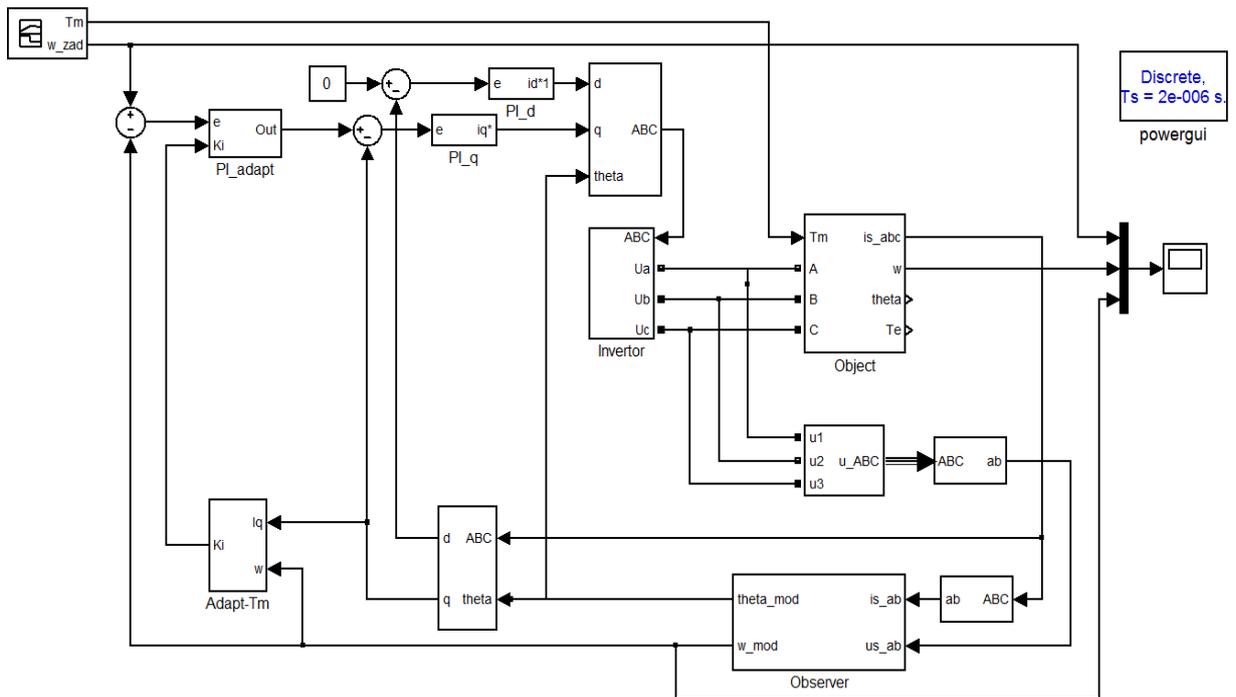


Рисунок 1 - Структурная схема математической модели электромеханической системы на базе БДПТ с наблюдателем состояния

Figure 1 - Structural scheme of the mathematical model of electromechanical system based on contactless DC motor with the state observer

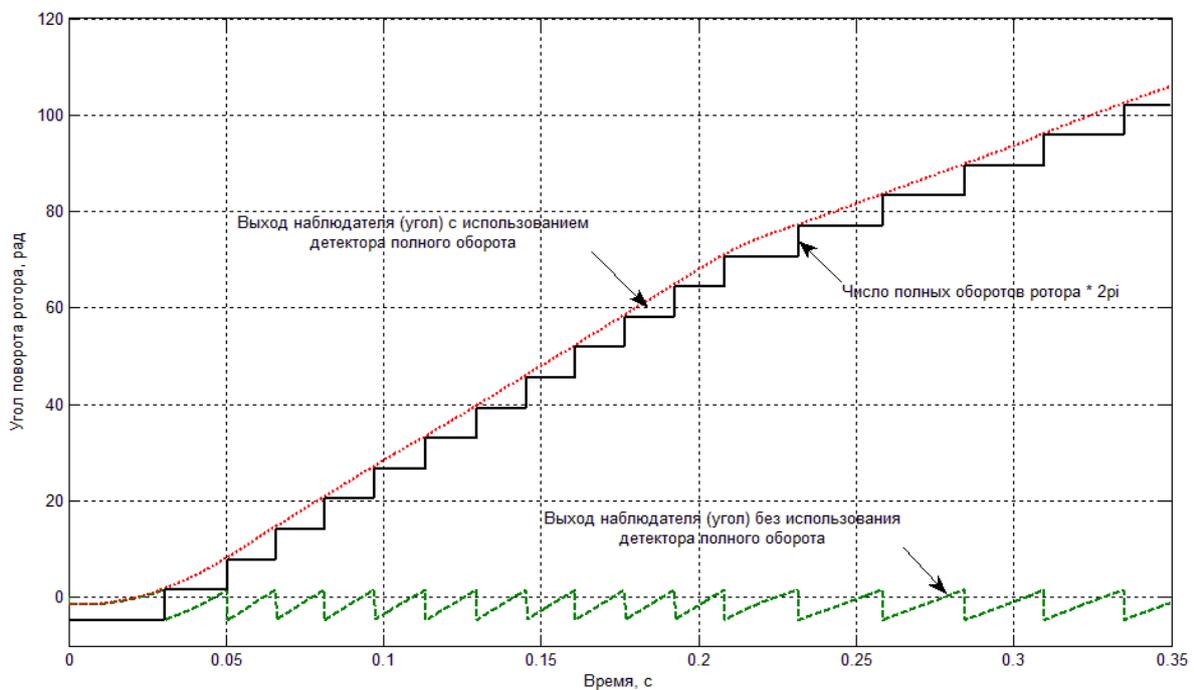


Рисунок 2 - Зависимость угла поворота ротора двигателя с выхода наблюдателя состояния  
 Figure 2 - Dependence of the rotation angle of the motor rotor on the output of the state observer

Если считать, что процессы, которые протекают при переключении только базовых векторов, идентичны по всем параметрам, кроме расположения в пространстве, то при расчете можно перемещать начало координат в новую точку пространства (расположение базового вектора) и получить периодические процессы для создания электромагнитного момента.

Проанализируем состояние системы с позиции пульсирующего вектора, который принадлежит одному базовому вектору (постоянное расположение в пространстве). Рассмотрим процессы, которые протекают за счет формирования пульсирующего вектора, для этого сделаем следующие допущения:

- период пульсирующего вектора меньше электромагнитной постоянной времени контура тока обмоток двигателя;
- скорость затухания переходных процессов в электрической цепи статора может отличаться в нулевом векторе (зависит от контура рассеивания запасенной электромагнитной энергии);
- токовое поле непрерывное, то есть за время существования пульсирующего импульса напряжения, ток не принимает нулевого значения;
- ЭДС, наводимая в обмотках статора за время существования одного пульсирующего импульса можно считать постоянной.

Нулевой вектор можно регулировать за счет изменения контура рассеивания накопленной электромагнитной энергии за время существования базового вектора.

На Рисунке 3 приведена зависимость угла поворота ротора с наблюдателя состояния с различными условиями дискретизации по уровню.

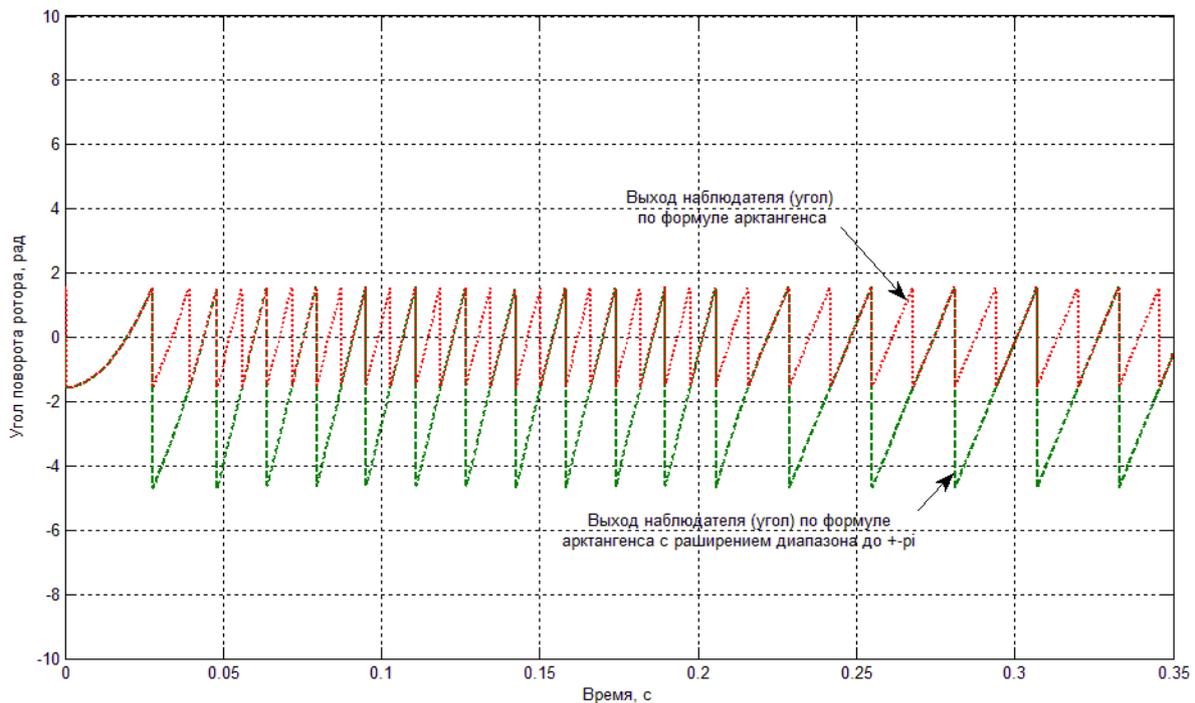


Рисунок 3 - Зависимость угла поворота ротора с наблюдателя состояния с различными условиями дискретизации по уровню

Figure 3 - Dependence of the rotation angle of the rotor on the state observer with different level sampling conditions

### Заключение

Применение в электромеханической системе бесконтактного двигателя постоянного тока, который позволяет использовать современные методы формирования и реализации адаптивного локально-оптимального управления открывает новые возможности для создания устройств, повышающих эффективность технологического оборудования. Проведенные исследования показали возможности осуществления локально-оптимального управления, построенного на определении чувствительности одного пульсирующего вектора. Задача рассмотрена как многокритериальная в связи с тем, что оптимизацию можно проводить по различным параметрам импульса, включая такие как изменение постоянной времени контура рассеивания накопленной энергии за время импульса. Это наиболее эффективно в случае формирования управляющего сигнала, для обеспечения уменьшения скорости с максимально возможным быстродействием, используя, например, режим, обеспечивающий изменение направления вращения дискретного вращающегося поля (изменения порядка чередования переключения базовых векторов).

При разработке алгоритмов управления систем с БДПТ учитывают не только такие качественные оценки как быстродействия (с учетом ограничений на потребляемую мощность), точность управления, а так же влияние на качество технологического процесса. Выбор управления при реализации систем с БДПТ оптимальной сложности является актуальной и требует анализа на уровне задач принятия решения в системах управления, а в некоторых ситуациях даже возникают вопросы принятия оперативных решений. При этом необходимо учесть в едином комплексе факторов, определяющих задачи принятий решений, не только факторы сложности и эффективности, но и неопределенности и многокритериальности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Киселёва Д.Д., Рощупкин Д.Ф. Формирование оператора перехода в системе управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *В сборнике: Наука в современном информационном обществе. Материалы XXIV международной научно - практической конференции.* North Charleston, Morrisville. 2020:144-147.
2. 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.
3. Винокуров С.А., Букатова В.Е., Киселёва О.А. Исследование процесса коммутации и динамики бесконтактных двигателей постоянного тока. *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2008;4(3):83-85.
4. 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;1(35):205-208.
5. 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.
6. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Попова Т.В., Тимошкин А.Ю., Бабенко В.В. Энергосберегающее управление электроприводом с бесконтактным двигателем постоянного тока. *В сборнике: Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно-практической конференции.* 2020:299-300.
7. 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.
8. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Попова Т.В. Дискретный эквивалент идеальному векторному управлению бесконтактным двигателем постоянного тока *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;1(16):16.
  9. Винокуров С.А., Букатова В.Е., Киселева О.А. Особенности параметрической и сигнальной адаптации в электромеханических системах с бесконтактными двигателями постоянного тока. *Системы управления и информационные технологии*. 2009;1-2(35):225-229.
  10. Винокуров С.А., Букатова В.Е., Киселёва О.А. Адаптивное управление с явной эталонной моделью в электромеханических системах с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Системы управления и информационные технологии*. 2007;4(30):82-86.
  11. Киселёва О.А., Попова Т.В. Неполная обратная связь в системах с бесконтактными двигателями постоянного тока. *В сборнике: Интеллектуальные информационные системы* 2012: 69-70.
  12. Киселева О.А., Букатова В.Е., Попова Т.В. Экстремальные системы с бесконтактными двигателями постоянного тока и неполной обратной связью *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009;2:31-34.
  13. 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;4(27):25-26.
  14. Киселёва О.А., Попова Т.В., Тимошкин А.Ю. Особенности применения наблюдателя состояний в бесконтактном двигателе постоянного тока *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019; 4(27):24-25.
  15. Винокуров С.А., Киселева О.А., Букатова В.Е. Моделирование и синтез контура адаптации в электромеханических системах с бесконтактными двигателями постоянного тока. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2007;3(5):126-128.
  16. Киселёва О.А., Винокуров С.А., Попова Т.В., Киселёва Д.Д. Особенности управления дискретным вращающимся полем в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *В сборнике: Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы XXIII международной научно-практической конференции*. North Charleston, Morrisville. 2020:69-71.
  17. Пархоменко Г.А., Киселёва О.А., Федосова И.С., Бабенко В.В. Особенности векторного управления бесконтактным двигателем постоянного тока. *Энергия - XXI век*. 2016;3(95):72-79.
  18. Киселёва Д.Д., Рубцов Н.И., Винокуров С.А. Чувствительность электромагнитного момента в системе с бесконтактным двигателем постоянного тока. *Научный журнал «Студент и наука»*. 2020;4(15):33-36.

## REFERENCES

1. Kiseleva O. A., Vinokurov S. A., Kiseleva D. D., Roshchupkin D. F. Formation of the transition operator in the control system of a contactless DC motor. In the collection: *Science in the modern information society*. Proceedings of the XXIV International Scientific and practical conference. North Charleston, Morrisville. 2020:144-147.
2. Kiselev D. P., Fedosova I. S., Kiseleva O. A. Formation of control pulses of a contactless DC motor in the starting mode. *Modeling, optimization, and information technology*.

- 2015;4(11):3.
3. Vinokurov S. A., Bukatova V. E., Kiseleva O. A. Investigation of the switching process and dynamics of contactless DC motors. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2008;4(3):83-85.
  4. Vinokurov S. A., Kiseleva O. A., Bukatova V. E. Discrete continuous control systems in electric drives with contactless DC motors. *Management systems and information technologies*. 2009;1(35):205-208.
  5. Kiseleva O. A., Romanov A. V., Kiselev D. P. Mathematical model of the control system of a contactless DC motor. *Modeling, optimization, and information technology*. 2015;1(8):3.
  6. Kiseleva O. A., Vinokurov S. A., Popova T. V., Timoshkin A. Yu., Babenko V. V. Energy-saving control of an electric drive with a contactless DC motor. In the collection: *Alternative and intelligent energy. Materials of the II International Scientific and Practical Conference*. 2020:299-300.
  7. 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.
  8. Kiseleva O. A., Vinokurov S. A., Popova T. V. Discrete equivalent to the ideal vector control of a contactless DC motor. *Modeling, optimization, and information technology*. 2017;1(16):16.
  9. Vinokurov S. A., Bukatova V. E., Kiseleva O. A. Features of parametric and signal adaptation in electromechanical systems with contactless DC motors. *Management systems and information technologies*. 2009;1-2(35):225-229.
  10. Vinokurov S. A., Bukatova V. E., Kiseleva O. A. Adaptive control with an explicit reference model in electromechanical systems with a contactless DC motor. *Management systems and information technologies*. 2007;4(30):82-86.
  11. Kiseleva O. A., Popova T. V. Incomplete feedback in systems with contactless DC motors. *In the collection: Intelligent information systems*. 2012:69-70.
  12. Kiseleva O. A., Bukatova V. E., Popova T. V. Extreme systems with contactless DC motors and incomplete feedback. *Electrotechnical complexes and control systems*. 2009;2:31-34.
  13. 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;4(27):25-26.
  14. Kiseleva O. A., Popova T. V., Timoshkin A. Yu. Features of the state observer application in a contactless DC motor. *Modeling, optimization, and information technology*. 2019;4(27):24-25.
  15. Vinokurov S. A., Kiseleva O. A., Bukatova V. E. Modeling and synthesis of the adaptation circuit in electromechanical systems with contactless DC motors. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2007;3(5):126-128.
  16. Kiseleva O. A., Vinokurov S. A., Popova T. V., Kiseleva D. D. Features of control of a discrete rotating field in an electric drive with a contactless DC motor. In the collection: *Fundamental and applied sciences today. Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference*. North Charleston, Morrisville. 2020:69-71.
  17. Parkhomenko G. A., Kiseleva O. A., Fedosova I. S., Babenko V. V. Features of vector control of a contactless DC motor. *Energy-XXI century*. 2016;3(95):72-79.
  18. Kiseleva D. D., Rubtsov N. I., Vinokurov S. A. Sensitivity of the electromagnetic moment in a system with a contactless DC motor. *Scientific journal "Student and Science"*. 2020;4(15):33-36.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Киселёва Ольга Алексеевна**, старший преподаватель кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Российская Федерация.  
*e-mail:* [kis.ola@mail.ru](mailto:kis.ola@mail.ru)

**Kiseleva Olga Alekseevna**, Senior Lecturer, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation.

**Винокуров Станислав Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Российская Федерация.  
*e-mail:* [stvinokurov@rambler.ru](mailto:stvinokurov@rambler.ru)

**Vinokurov Stanislav Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation.

**Киселёва Дарья Дмитриевна**, студентка кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Российская Федерация.  
*e-mail:* [kis.daria02@mail.ru](mailto:kis.daria02@mail.ru)

**Kiseleva Darya Dmitrievna**, student of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russian Federation.