

Непосредственное векторное управление асинхронными электроприводами с использованием прогнозирующих моделей

А.А.З. Диаб, Д.А. Котин, В.В. Панкратов

В статье рассматривается система векторного управления скоростью асинхронного двигателя, построенная на основе принципа прогнозирующей модели (Model Predictive Control – MPC). Задача данной работы – управление скоростью/моментом, потокосцеплением ротора и токами двигателя в системе векторного управления (ВУ) асинхронным двигателем (АД) с непосредственным ориентированием по полю при действии неконтролируемых внешних возмущений со стороны нагрузки. Используется три MPC-регулятора: один – для регулирования скорости вращения двигателя, второй – для управления потокосцеплением ротора, последний предназначен для управления токами двигателя. Простые модели асинхронного двигателя используются в структуре MPC так, чтобы минимизировать вычислительную нагрузку на контроллер. Представлены результаты цифрового моделирования.

Управление с прогнозированием по модели (УПМ)

Основные преимущества УПМ [1 - 3]:

- Применимость к широкому классу объектов управления, как простых, так и очень сложных, в том числе объекты с большим запаздыванием, неустойчивые и неминимальнофазовые системы;
- Простая реализация для многоканальных (Multi Input – Multi Output, МИМО) систем с многих переменных;
- Возмущения и ограничения на управляющее воздействие и выходные переменные процесса учитываются изначально, на стадии разработке регулятора.

В данной модели УПМ- регулятор отличается от ПИ- регулятора. УПМ- регулятор имеет два входных сигнала: один сигнал задания, а другой сигнал нагрузки или скорости выходного вала АД, как показано на рис 1.а.

Схема осуществления прогноза для дискретного объекта иллюстрируется рис. 1.б.

Общая схема УПМ состоит из следующих действий:

1. Измерение или оценивание вектора состояния x_k реального объекта:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{A}\tilde{x}_k + \tilde{B}\tilde{u}_k + \tilde{H}d_k, \quad \tilde{y}_k = \tilde{C}\tilde{x}_k + w_k, \quad (1)$$

здесь $k = 0, 1, 2, \dots$ - номер такта, определяющий дискретный момент времени $t = k\Delta t$, где Δt - шаг дискретности. Векторы $\tilde{x}_k \in E^n$, $\tilde{u}_k \in E^m$ и $\tilde{y}_k \in E^r$ представляют состояние объекта, управление и измерение соответственно в момент времени $t = k\Delta t$, а $d_k \in E^{nd}$ и $w_k \in E^r$ - внешнее возмущение и шум в измерениях в этот же дискретный момент. Матрицы \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C} и \tilde{D} имеют постоянные во времени компоненты.

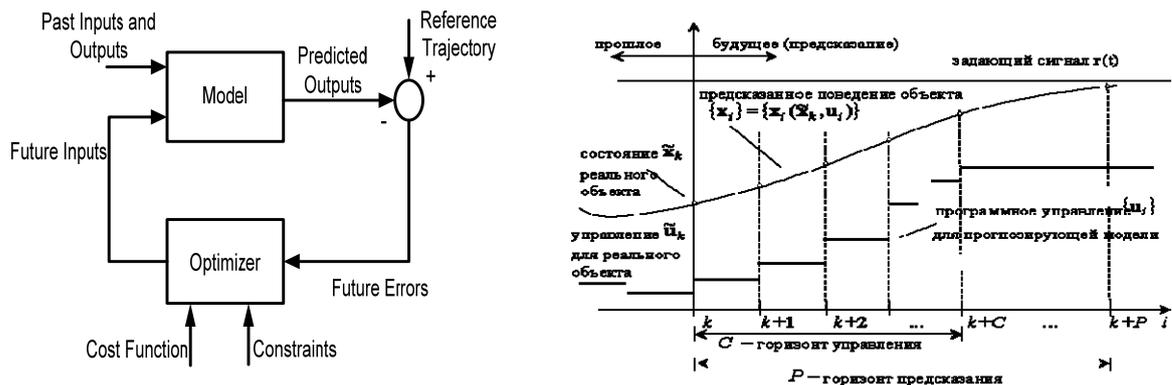


Рис. 1. – а) Базовая структура УПМ- контроллера; б) Схема осуществления прогноза для дискретного объекта.

2. Решение оптимизационной задачи для прогнозирующей модели с начальным условием \tilde{x}_k по отношению к:

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i, \quad i = k + j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad x_k = \tilde{x}_k, \quad y_i = Cx_i. \quad (2)$$

Здесь размерности векторов состояния, управления и измерения такие же, как и в системе (1). Будем полагать, что заданные фиксированные матрицы A , B и C приближенно представляют матрицы \tilde{A} , \tilde{B} и \tilde{C} .

Пусть прогнозирующая модель (2) на начальном такте $j = 0$ инициализируется состоянием \tilde{x}_k объекта управления, достигнутого на k -м такте его

функционирования. Кроме того, пусть выполняются равенства $\bar{u}_i = u_i$ для любого $i=k, k+1, \dots, k+P$.

3. Оптимальной функции использоваться в качестве программного управления на отрезке. Качество управления УПМ будем оценивать значениями квадратичного функционала (КФ).

$$J_k = J_k(\bar{y}, \Delta\bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R_{k+j} (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q_{k+j} \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (3)$$

где R_{k+j} и Q_{k+j} - заданные положительно определенные матрицы,

$$\begin{aligned} \bar{y} &= (y_{k+j} \ y_{k+2} \ \dots \ y_{k+P})^T \in E^{rP} \\ \Delta\bar{u} &= (\Delta u_{k+j} \ \Delta u_{k+1} \ \dots \ \Delta u_{k+P-1})^T \in E^{mP} \end{aligned} \quad (4)$$

- векторы, представляющие регулируемые и управляющие последовательности соответственно на горизонте прогноза. Использование функционала (3), наряду с оптимизацией динамики, позволяет обеспечить астатизм замкнутой системы.

Ранее рассматривалась оптимизационная задача

$$J_k = J_k(\bar{y}(\Delta\bar{u}), \Delta\bar{u}) = J_k(\Delta\bar{u}) \rightarrow \min_{\Delta\bar{u} \in E^{mP}} \quad (5)$$

о поиске программной последовательности векторов Δu_i , которая минимизирует функционал (3) с учетом ограничений.

Теперь потребуем, чтобы на любом шаге процесса выполнялись ограничения вида

$$\begin{aligned} u_i^- &\leq u_i \leq u_i^+ \\ \Delta u_i^- &\leq \Delta u_i \leq \Delta u_i^+ \end{aligned} \quad (6)$$

на управляющие переменные и ограничения

$$y_i^- \leq y_i \leq y_i^+ \quad (7)$$

на выходные переменные, где u_i^- , u_i^+ , Δu_i^- , Δu_i^+ и y_i^- , y_i^+ - заданные векторы

Замечание: неравенства в приведенных уравнениях понимаются по каждой из компонент своих векторов.

4. Замена момента времени k на момент $k + 1$ и повторение операций, указанных на стадиях 1 - 3.

Заметим, вопрос о минимизации интегрального КФ при наличии ограничений сводится к стандартной задаче численного анализа - к задаче выпуклого КФ. Для поиска точки экстремума, которая является либо внутренней, либо граничной точкой множества, могут быть привлечены известные численные методы. В данной работе используется метод барьерной функции, не требующий большого объема памяти.

Исследование работы УПМ в системе векторного управления асинхронным двигателем

В данной работе для синтеза регуляторов использовались линеаризованные модели АД, как в [4 - 6], не подразумевающие оценивания возмущений и производных типа [7, 8].

Поэтому ее порядок снижен путем применения упрощенной модели механической части электропривода. При векторном управлении моментом операторное уравнение двигателя в составе УПМ- контроллера скорости может быть записано как

$$\omega_r(p) = \frac{1}{J_S} (T_e(p) - T_L(p)). \quad (8)$$

Упрощенная линеаризованная модель АД описана в составе УПМ- контроллера токов как

$$W(p) = \frac{I_s}{U_s - f_s} = \frac{1}{L_{se}p + R_e}, \quad (9)$$

где $f_s = \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} E - \omega_e D \right) \psi_r$.

Упрощенная линеаризованная модель АД в составе УПМ- контроллера потокосцепления:

$$W(p) = \frac{\psi_{rm}}{i_{sd}} = \frac{L_m}{T_r p + 1}. \quad (10)$$

Результаты моделирования

Построение динамических характеристик системы векторного управления АД будем производить методом цифрового моделирования в программе «MATLAB-Simulink».

Для сравнения рассмотрим переходные процессы системы управления с ПИ- регулятором и УПИМ- регулятором. Графики переходных процессов с использованием УПИМ- регулятора приведены на рис. 2 при работе на номинальной частоте вращения с номинальной двигательной нагрузкой и на рис. 3 – при работе на 0.005 от номинальной частоте вращения с номинальной нагрузкой. Графики переходных процессов с использованием ПИ- регулятора показаны на рис. 4.

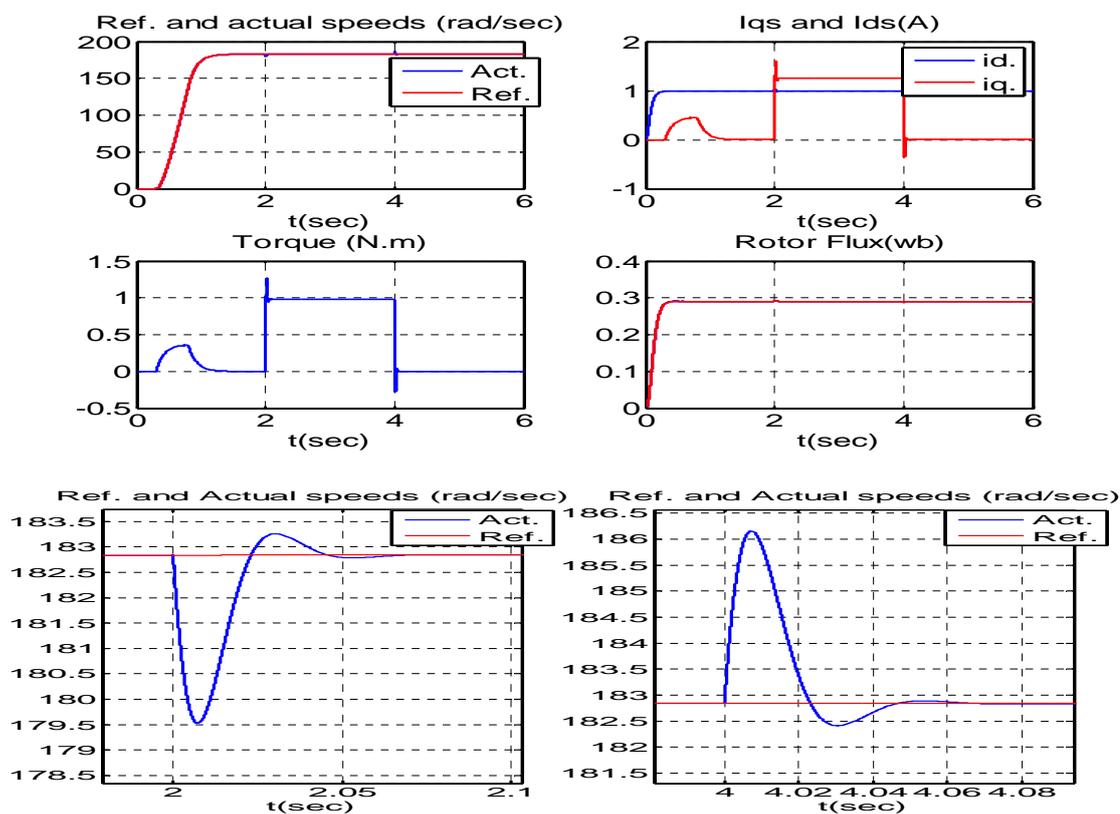


Рис. 2. – Графики переходных процессов в системе ВУ АД с УПИМ- регулятором при работе на номинальной частоте вращения с номинальной нагрузкой.

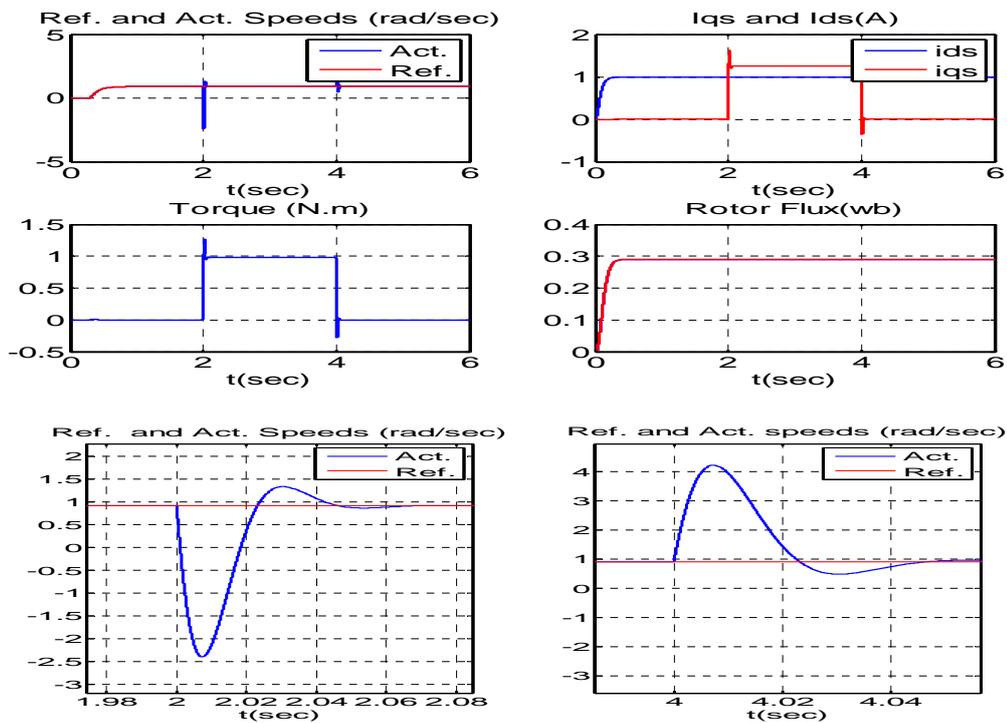


Рис. 3. – Графики переходных процессов в системе ВУ АД с УПМ-регулятором при работе на 0.005 от номинальной частоты вращения с номинальной нагрузкой.

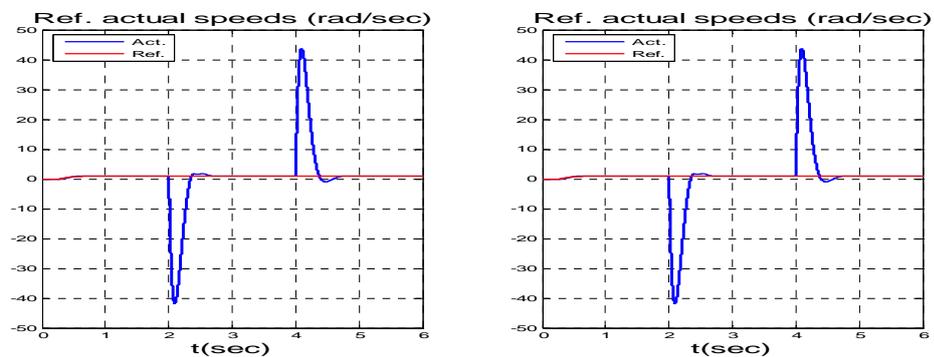


Рис. 4. – Графики переходных процессов в системе ВУ АД с ПИ-регулятором при работе на 0.005 от номинальной частоты вращения с номинальной нагрузкой.

Выводы

С помощью моделирования в программе Matlab-Simulink проведено исследование работы УПМ- регулятора в системах векторного управления скоростью АД. Синтезированная система исследована в статических и динамических режимах. Результаты получены для режимов работы: пуск на холстом ходу и с нагрузкой, внезапный наброс нагрузки в установившемся

режиме. Показано, что по величинам тока двигателя, крутящего момента и скорости эффективность УПМ- контроллера оказалась лучше, чем у ПИ- регулятора скорости.

Синтезированная система обеспечивает высокие динамические характеристики, плавность хода и глубокий диапазон регулирования скорости и крутящего момента. Использование в электроприводах отрицательной обратной связи по скорости и УПМ- регуляторов позволяет достигать высокой точности стабилизации заданных скорости и момента, быструю реакцию на внешние возмущающие воздействия при требуемом качестве переходного процесса. Полученные результаты могут быть использованы при построении бездатчиковых систем общепромышленного электропривода [9, 10].

Литература

1. Коростелев, А.Я. Система с прогнозирующей моделью для управления формой и током плазмы в токамаке [Текст] / Ю.В. Митришкин, А.Я. Коростелев // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 19-25.

2. Коростелев, А.Я. Система с прогнозирующей моделью для магнитного управления плазмой в токамаке [Текст] / А.Я. Коростелев, Ю.В. Митришкин // Студенческий научный вестник. Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции Студенческая научная весна - 2007. — М.: НТА АПФН, 2007. — Том IV, часть 1. – С. 183-184.

3. Веремей, Е.И. Пособие «Model Predictive Control Toolbox» [Электронный ресурс] / Е.И. Веремей, В.В. Еремеев, М.В. Сотникова // Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/book1/index.php> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

4. Diab, A.A.Z. Vector controlled induction motor drive based on model predictive control [Текст] / A.A.Z Diab, V.V. Pankratov // Proceedings of XI International conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE-2012 (Novosibirsk, 2 – 4 October 2012 г.), vol. 1. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – pp. 167 – 173.

5. Diab, A.Z. Model predictive control of vector controlled induction motor

drive [Текст] / A.Z. Diab, V.V. Pankratov // Proceedings of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – Tomsk, September 17 – 21, 2012, V. II, pp. 21 – 26.

6. Diab, A.Z. Speed Control of Sensorless Induction Motor Drive Based on Model Predictive Control [Текст] / A.Z. Diab, D.A. Kotin, V.V. Pankratov // Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013). – Erlagol, Altai, July 1 – 5, 2013, pp. 269 – 274.

7. Медведев, М.Ю. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора [Электронный ресурс] / М.Ю. Медведев, В.А. Шевченко // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1930> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Пшихопов, В.Х. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных [Электронный ресурс] / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев // Инженерный вестник Дона, 2011, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/431> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

9. Вдовин, В.В. Глобально устойчивый адаптивный наблюдатель для систем общепромышленного асинхронного электропривода [Текст] / В.В. Панкратов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, Г.Г. Ситников // Электротехника. – 2011. – №6. – С.42 – 47.

10. Вдовин, В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода [Текст] / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, №4. Энергетика. – Томск: Изд-во ТПУ. – С. 147 – 153.