

Бездатчиковое векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами
основанное на модели эталонной адаптивной системы

Резюме - В статье анализируются основные принципы модели эталонной адаптивной системы (MRAS) алгоритма. В этой статье положение ротора и скорость СДПМ были рассчитаны на основе MRAS и были применены в бездатчиковой системе управление СДПМ. Основанная на MRAS бездатчиковая система управление, разработана в среде программирование Matlab/Simulink. Был смоделирован эксперимент и получены результаты исследование системы при старте двигателя, изменение скорости и нагрузки. Результаты экспериментов доказали, что бездатчиковая система управление основанная на MRAS алгоритме имеет хорошие показатели управление и алгоритм может точно рассчитывать положение ротора и его скорость.

Ключевые слова - синхронный двигатель с постоянными магнитами, модель эталонной адаптивной системы, бездатчиковое управление, векторное управление

I. Вступление

Синхронный двигатель с постоянными магнитами высокой точностью управления, такими видами управление как векторное и прямое управление моментом необходимо точно определять положение ротора в реальном времени и скорость [1]. Инженеры часто устанавливают в двигатель датчики. Но этот метод увеличивает стоимость и увеличивает габариты системы и уменьшает ее надежность. Поэтому необходимо избавиться от механического датчика и в тоже время взять другое направление развития [2]. Следовательно, бездатчиковый метод управление, который поможет избавиться от механического датчика, увеличит надежность системы, уменьшит стоимость системы, а сигнал положения - это основной параметр в среде управления двигателем [3-4].

На сегодняшний день, самые распространенные методы бездатчикового управление для СДПМ таковы:

1) Скорость и положение рассчитывается методом, основанным на потокоцеплении СДПМ. Этот метод рассчитывает скорость вращения и положение ротора посредством пространственного положение потока статора (расчет положение через противо-ЭДС). Метод имеет преимущества в простоте расчетов и быстрым динамическим откликом [5]. Тем не менее, точность расчетов параметров двигателя должны быть высокими, устройство должно быть объединено к устройству по определению параметров двигателя в реальном времени, а при низкой скорости, этот метод оценивает менее точно, из-за уменьшении значения противо-ЭДС [6-7].

2) Посредством вычисления значения индуктивности для оценки скорости и положения, этот метод применим только к синхронному двигателю с постоянным магнитом с эффектом явновыраженного полюса, а время расчета положения ротора слишком велико [8-9].

3) Метод высокочастотного впрыска сигналов, метод использует эффект явновыраженного полюса двигателя для оценки фактического положение ротора путем введения высокочастотного сигнала в обмотки статора двигателя. Этот метод менее зависим от параметров двигателя, но применим только для низкоскоростного бездатчикового управления. Результат управление СДПМ без эффекта явновыраженного полюса показывают плохую точность [10].

4) Метод наблюдателя скользящего режима, контур управления модифицируется в структуру скользящего режима и движение режима скольжения не зависит от изменения параметров и возмущение объекта управления, поэтому он имеет хорошую прочность. Однако, переменная структура режима скольжения это, по сути, дискретный переключатель управления, который может вызвать дребезг системы, которые вредны для векторного управления при низких скоростях и будет вызывать большие пульсации момента [11-12].

В этой статье, алгоритм MRAS используется для определения скорости ротора и положения СДПМ. Основываясь на данном алгоритме, была построена бездатчиковая модель векторного управления СДПМ. Построенная экспериментальный стенд векторного управления, модель и экспериментальные результаты показывают, что алгоритм MRAS может точно рассчитать скорость ротора и положение и это подходит для бездатчикового векторного управления СДПМ.

II. Модель адаптивного векторного управления

A. Определение модели и регулируемость модели

Математическая модель тока статора СДПМ в d-q системе координатных осей это:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega_r i_q + \frac{u_d}{L} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega_r i_d - \frac{\psi_r}{L} + \frac{u_q}{L} \quad (2)$$

Согласно этим двум уравнениям, модель тока статора СДПМ в d-q осевой системе зависит только от ее скорости, поэтому выбрана эта модель тока как регулирующая модель, СДПМ представляет из себя эталонную (опорную) модель и использует параллельную структуру для определения скорости. Чтобы анализировать надежность системы, скорость ограничена в матрице состояния системы, сделаны несколько соответствующих изменений в переменных управления и переменных состояния этих двух уравнений и мы можем получить следующее:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d + \frac{R\psi_r}{L} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

Допустим:

$$i'_d = i_d + \frac{\psi_r}{L}, \quad i'_q = i_q, \quad u'_d = u_d + \frac{R\psi_r}{L}, \quad u'_q = u_q;$$

Тогда:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Упрощенная форма выглядит следующим образом:

$$\frac{di'}{dt} = Ai' + Bu' \quad (5)$$

В приведенных выше уравнениях:

$$i' = \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix}, \quad u' = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad B = \frac{1}{L}.$$

Матрица состояний уравнений (4) содержит информацию о скорости ротора, поэтому это уравнение используется в качестве как регулируемой модели, а сам СДПМ используется в качестве эталонной модели. Копируя уравнение (4), выражая ток и напряжение в уравнении (4) через расчетное значение, можно получить уравнение (6):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

Упрощая по такому же самому принципу, получим:

$$\frac{d\hat{i}'}{dt} = \hat{A}\hat{i}' + Bu' \quad (7)$$

Используя уравнение (4) и отнимаем от него уравнение (6), мы получим:

$$\begin{bmatrix} \frac{de_d}{dt} \\ \frac{de_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - J \left(\omega_r - \hat{\omega}_r \right) \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

В приведенном выше уравнении:

$$e_d = i'_d - \hat{i}'_d, \quad e_q = i'_q - \hat{i}'_q, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение (8) можно упростить до:

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= A_e e - \omega \\ v &= D e \end{aligned} \quad (9)$$

В уравнении выше:

$$A_e = A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix}, \quad \omega = \left(\omega_r - \hat{\omega}_r \right) \begin{bmatrix} -\hat{i}'_q \\ \hat{i}'_d \end{bmatrix}$$

Уравнение (9) это уравнение векторной ошибки тока статора. Стандартную систему обратной связи можно получить так, как показано на Рис.1:

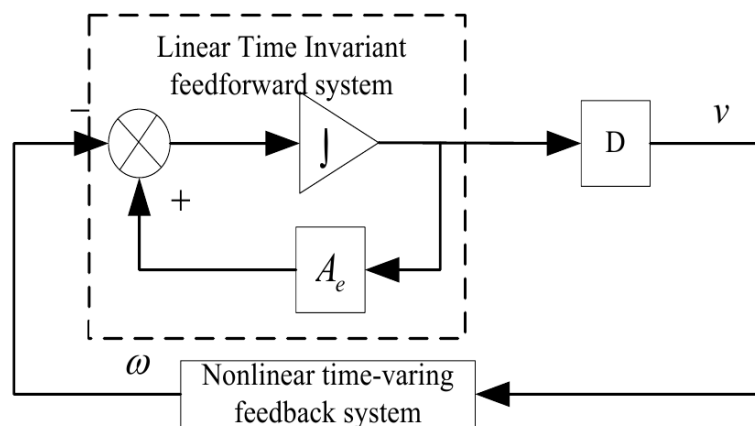


Рисунок 1. Эквивалентная нелинейная система обратной связи

В. Определение адаптивного закона

Для того, чтобы конструкция имела хорошо работающий MRAS алгоритм, необходимо определить подходящий адаптивный закон. Адаптивный закон обычно выбирается в виде пропорциональной и интегральной части. Разрабатывая подходящий адаптивный закон, требуется найти соотношение между суммой прямой ветви и суммой обратной связи. Эта нелинейная изменчивая во времени система обратной связи используется для выражения этого соотношения. MRAS была разработана согласно теории суперустойчивости Попова. Она может не только приблизить регулируемую модель к эталонной модели, но также гарантировать стабильность данной системы. Поэтому в данной статье используется теория суперустойчивости Попова в разработке адаптивного закона.

Нелинейная переменная часть удовлетворяет интегральное неравенство Попова:

$$\eta(0, t_0) = \int_0^{t_0} v^T \omega dt \geq \gamma_0^2 \quad (10)$$

$\forall t_0 \geq 0$, γ_0^2 - это любое конечное положительное число.

Заменим v и ω в интегральном неравенстве Попова (10):

$$\eta(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T \left(\hat{\omega}_r - \omega_r \right) J \dot{i} dt \geq \lambda_0^2 \quad (11)$$

Согласно общей структуре модели адаптивного эталонного параметра, возьмем $\hat{\omega}_r$ и вставим в пропорциональную интегральную форму следующего уравнения (12):

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t F_1(v, t, \tau) d\tau + F_2(v, t) + \hat{\omega}_r(0) \quad (12)$$

В уравнении выше, $\hat{\omega}_r(0)$ – это исходное значение. Уравнение (12) показывает пропорциональную интегральную структуру. Подставляем уравнение (12) в уравнение (11):

$$\begin{aligned} & \eta(0, t_0) \\ &= \int_0^{t_0} e^T \left[\int_0^t F_1(v, t, \tau) d\tau + F_2(v, t) + \hat{\omega}_r(0) \right] J \dot{i} dt \\ &= \int_0^{t_0} e^T \left[\int_0^t F_1(v, t, \tau) d\tau + \hat{\omega}_r(0) - \omega_r \right] J \dot{i} dt \quad (13) \\ & \quad + \int_0^{t_0} e^T F_2(v, t) J \dot{i} dt \\ &= \eta_1(0, t_0) + \eta_2(0, t_0) \end{aligned}$$

Примем $\eta(0, t_0) \geq \gamma_0^2$, мы можем получить

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t_0) &= \int_0^{t_0} e^T \left[\int_0^t F_1(v, t, \tau) + \hat{\omega}_r(0) - \omega_r \right] J \dot{i} dt \geq \gamma_1^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\eta_2(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T F_2(v, t) J \dot{i} dt \geq \gamma_2^2 \quad (15)$$

В уравнении выше γ_1^2 и γ_2^2 конечные положительные числа. Уравнение (16) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_0} \frac{df(t)}{dt} k f(t) dt &= \frac{2}{k} [f^2(t_0) - f^2(0)] \geq \frac{1}{2} k f^2(0) \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь:

$$\frac{df(t)}{dt} = e^T J \dot{i} \quad (17)$$

$$k f(t) = \int_0^t F_1(v, t, \tau) d\tau + \hat{\omega}(0) - \omega_r \quad (18)$$

Дифференцируя уравнение (18) получим:

$$F_1(v, t, \tau) = k_i e^T J \dot{i} \quad (19)$$

Подставим уравнение (19) в $\eta_1(0, t_0)$, и можно гарантировать, что $\eta_1(0, t_0) \geq \gamma_1^2$. Если левая часть неравенства положительна, тогда неравенство составлено верно.. Допустим что:

$$F_2(v, t) = k_p e^T J \dot{i} \quad (20)$$

Очевидно, подставляем уравнение (19) и уравнение (20) в уравнение (13), и удовлетворяем интегральное неравенство Попова, что означает:

$$\begin{aligned} \eta(0, t_0) &= \int_0^{t_0} e^T \left[\int_0^t k_i e^T J \dot{i} d\tau + k_p e^T J \dot{i} + \hat{\omega}_r(0) - \omega_r \right] J \dot{i} dt \geq \gamma_0^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Улучшим уравнения (12)

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t k_i e^T J \hat{i}' d\tau + k_p e^T J \hat{i}' + \hat{\omega}_r(0) \quad (22)$$

Возьмем $\hat{\omega}_r$ и подставим в уравнение (22), обратная завязь от векторной ошибки тока статора должна быть асимптотически стабильная.

Подставим

$$e^T = \begin{bmatrix} \hat{i}'_d - \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q - \hat{i}'_q \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ and } \hat{i}' = \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix}$$

В уравнение (22) получим

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r = \int_0^t k_i \left(\hat{i}'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_q \hat{i}'_d \right) d\tau \\ + k_p \left(\hat{i}'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_q \hat{i}'_d \right) + \hat{\omega}_r(0) \end{aligned} \quad (23)$$

Подставим

$$\hat{i}'_d = i_d + \frac{\psi_r}{L}, \quad \hat{i}'_q = i_q, \quad \hat{u}'_d = u_d + \frac{R\psi_r}{L}, \quad \hat{u}'_q = u_q$$

В уравнение (23) и получим адаптивный закон:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r = \int_0^t k_i \left[\hat{i}'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_q \hat{i}'_d - \frac{\psi_r}{L} \left(i_q - \hat{i}'_q \right) \right] d\tau \\ + k_p \left[\hat{i}'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_q \hat{i}'_d - \frac{\psi_r}{L} \left(i_q - \hat{i}'_q \right) \right] + \hat{\omega}_r(0) \end{aligned} \quad (24)$$

В уравнении выше, \hat{i}'_d и \hat{i}'_q может быть рассчитаны через уравнение (6), а i_d и i_q будут рассчитаны после определения двигателя.

C. Векторное управление без датчика скорости основанной на MRAS

Вместо традиционного механического датчика, MRAS алгоритм используется для определения скорости ротора $\hat{\omega}_r$ и положения $\hat{\theta}$ СДПМ, затем посылает их в систему векторного управления СДПМ для поддержания нормальной работы.

Блок-диаграмма алгоритма определения скорости MRAS показано в Рис. 2. В регулирующей модели, скорость (ω_r) не только регулируемый параметр, но также параметр необходимы для определения, записанный в уравнении как $\hat{\omega}_r$. Если ток статора рассчитывается моделью так же, как определяться эталонной моделью, ошибкой между двух моделей будет составлять ноль, тогда рассчитанное значение скорости должно также содержать реальное значение (ω_r). На Рис. 2, используется векторная ошибка тока статора между регулирующей моделью и эталонной моделью. Сконструирован подходящий адаптивный закон по вышеупомянутой теории разработки адаптивного закона, что бы расчетная скорость $\hat{\omega}_r$ регулирующей модели была как можно ближе к реальной скорости (ω_r).

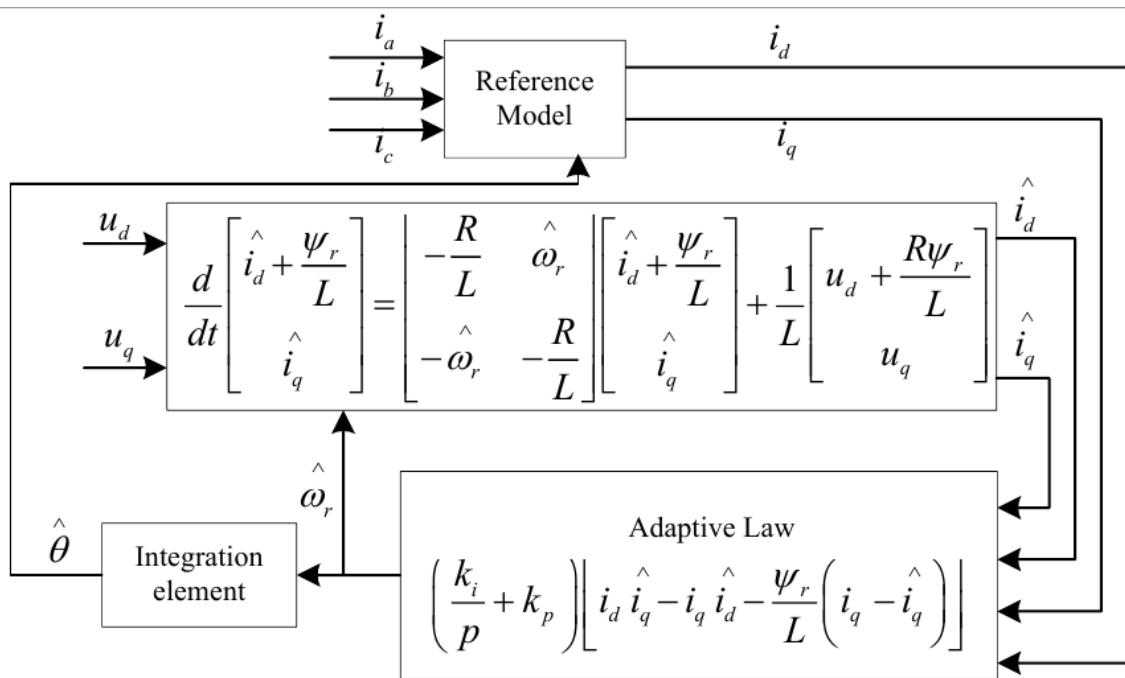


Рисунок 2. Блок-диаграмма определение скорости МРАС.

III. Моделирование и анализ

Работоспособность MRAS алгоритма проверено в MATLAB и был собран стенд бездвигательного векторного управления СДПМ. Среди прочего, был использован СДПМ с такими параметрами: номинальная мощность 1.3кВт, номинальное напряжение 110В, номинальная скорость 1200 об/мин, количество пар полюсов -2, поперечная и прямая индуктивность вала – 15.3 мГн, сопротивление статора составляет 0.56. Блок- диаграмма модели показано на Рис 3.

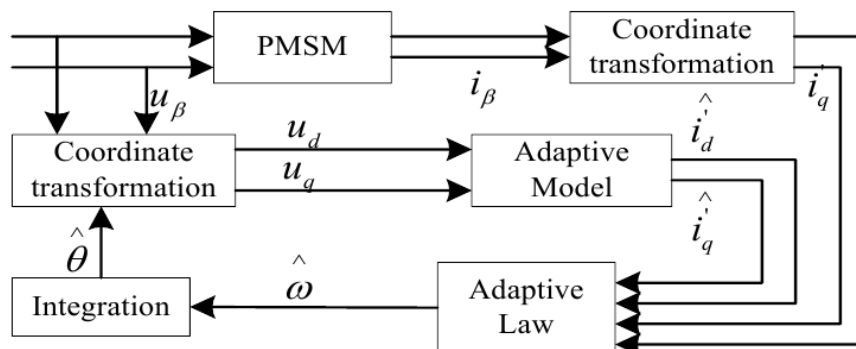


Рисунок 3. Блок-диаграмма расчета скорости для модели бездатчикового векторного управления основанная на MRAS

На Рис.4 показана фаза разгона двигателя. На Рис. 4 показано две кривые, первая это расчетная скорость двигателя, а вторая это реальная скорость двигателя. Если сравнить эти две кривые можно увидеть, что MRAS алгоритм может хорошо рассчитать скорость двигателя во время разгона двигателя. Расчетная скорость точно повторяет реальную скорость двигателя. Системе необходимо 0.07с для того чтобы выйти на установленный режим.

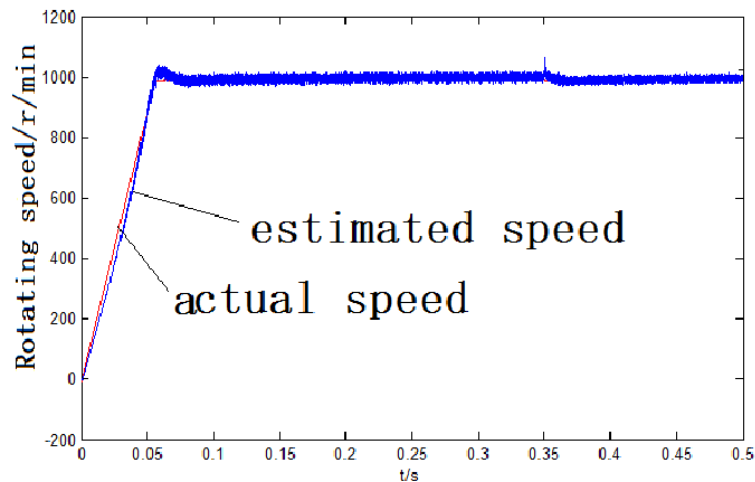


Рисунок 4. Сравнение расчетной скорости и реальной скорости в момент разгона.

В 0.25с, скорость изменилась с 1000 об/мин до 1500 об/мин. На Рис. 5, можно увидеть что расчетная скорость вращения достаточно точно повторяет реальную скорость двигателя и точность расчетов удовлетворяет требования системы векторного управления.. Во время старта двигателя и во время изменения скорости, ошибка скорости велика, но ошибка под действием MRAS алгоритма быстро уменьшается, и не происходят большие колебания скорости. Система может быстро достичь нового устойчивого состояния.

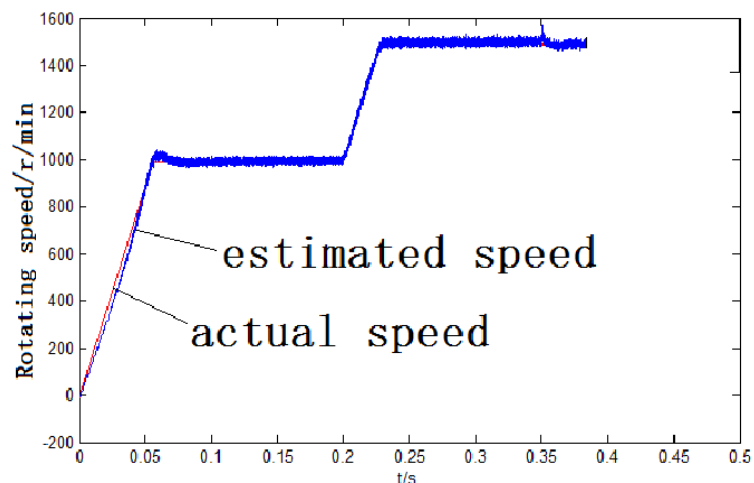


Рисунок 5. Сравнение расчетной и реальной скоростей при изменении скорости.

Выходной электромагнитный момент двигателя во время изменения скорости показан на Рис 6. Во время моделирования, был добавлен 1 Н*м к входному моменту нагрузки. Мы можем увидеть на рисунке, что выходной электромагнитный момент составляет примерно 1 Н*м. В 0.25с произошел большой скачек момента, из-за изменения скорости.

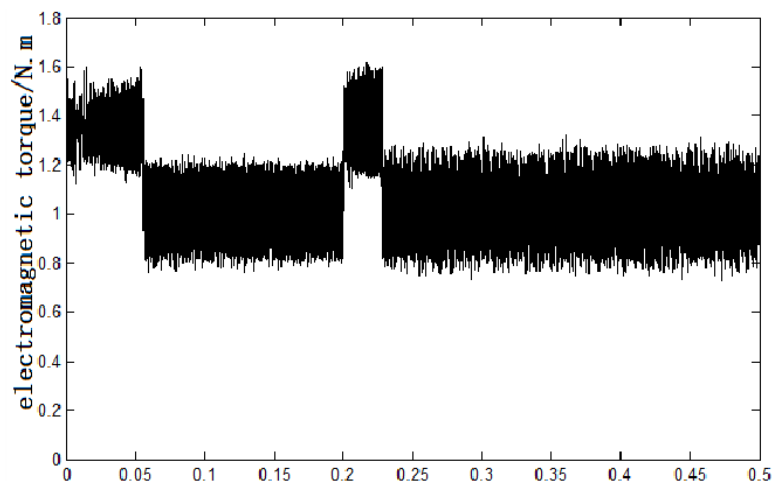


Рисунок 6. Выходной момент двигателя при изменении скорости.

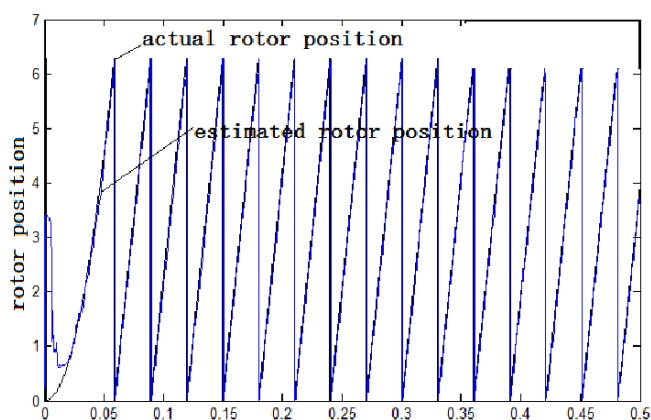


Рисунок 7. Сравнение расчетного и реального положение ротора при изменении скорости.

Векторному управлению необходимо точно знать реальное положение ротора двигателя. Вместо реального положения мы подаем расчетного положения ротора через МРАС алгоритм. Мы на Рис. 7 можем увидеть что, положение ротора, рассчитанное через алгоритм, может точно следовать за реальным положением ротора в режиме реального времени и этот алгоритм подходит для бездатчикового векторного управления СДПМ.

IV. Заключение

В этой статье, был применен алгоритм МРАС, который находится под действием бездатчикового векторного управления СДПМ, для расчета скорости ротора и его положения. Результат был проанализирован по трем аспектам: теория, моделирование, эксперимент. Результат показал что:

1. МРАС алгоритм имеет лучшую приспособленность во время старта, изменения скорости и изменении момента нагрузки СДПМ.
2. Система бездатчикового векторного управления основанном на МРАС алгоритме ,разработанный в этой статье, может точно следить за скоростью вращения и положением ротора СДПМ., имеет лучший эффективность и успешно реализовано бездатчиковое управление СДПМ.
3. Бездатчиковая система управления СДПМ основанная на МРАС может успешно заменить фотоэлектрический энкодер, улучшить стабильность системы и уменьшить стоимость, что и было целью данной работы