

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 681.518.22

СОВРЕМЕННЫЕ БЕЗДАТЧИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ НЕПОДВИЖНОГО РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

THE MODERN SENSORLESS METHODS OF ROTOR POSITION ESTIMATION OF PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS AT LOW SPEED

Семыкина Ирина Юрьевна,

доктор техн. наук, доцент, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

Semykina Irina Yu., Dr. Sc., Associate Professor

Тарнецкая Александра Викторовна,

аспирант, e-mail: unlogologo@gmail.com

Tarnetskaya Aleksandra V., postgraduate

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. Мощность синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), применяемых в современных промышленных установках, непрерывно повышается. Такие машины все чаще находят применение, например, в системах электропривода непрерывного транспорта. Наличие постоянных магнитов на роторе двигателя увеличивает энергоэффективность электропривода, но затрудняет его управляемость при пуске. Для подобных установок предпочтительно использовать бездатчиковые частотно-регулируемые электроприводы с векторным управлением. Однако для бездатчиковых систем векторного управления СДПМ требуется точное оценивание положения ротора в пространстве уже непосредственно на старте, поскольку синхронный двигатель с постоянными магнитами управляет в функции угла поворота ротора. Из-за отсутствия противоЭДС и потокосцеплений на скоростях близких к нулю, применить традиционные бездатчиковые методы оценивания положения ротора СДПМ не представляется возможным. В современных исследованиях предлагается ряд бездатчиковых методов оценивания положения неподвижного ротора. В данной статье представлено краткое описание этих методов, а также проводится их сравнительный анализ. На основе теоретического анализа сделаны выводы о целесообразности применения того или иного метода в бездатчиковых системах векторного управления СДПМ.

Abstract. The capacity of permanent magnet synchronous motors (PMSM) applied at modern industrial plants incessantly increases. For example, implementation of such motors in electric drive systems of conveyor transport is on the rise. Mounting of permanent magnets on the rotor increases the electric drive efficiency but it makes the controllability difficult at start. Sensorless frequency-controlled electric drives are advisable for conveyor transport systems. However, modern sensorless vector control systems require high estimation accuracy of the standstill rotor position, because the permanent-magnet synchronous motor is controlled in function of the rotor position angle. Due to absence of back-EMF and flux linkages in the close to zero low speed, applying of traditional sensorless methods for PMSM is not possible. Modern researches suggest different sensorless methods for estimation of standstill rotor position. This article contains a brief description of these methods, its analysis and comparison. Finally, based on theoretical analysis there are conclusions about appropriateness of particular methods on sensorless vector control systems for PMSM.

Ключевые слова: оценивание положения неподвижного ротора; синхронный двигатель с постоянными магнитами; бездатчиковые методы; метод высокочастотных сигналов; ШИМ-возбуждение.

Keywords: standstill rotor position estimation, permanent-magnet synchronous motor, sensorless control methods; high-frequency injection method; PWM-method.

Введение

Исследования последних десятилетий свиде-

тельствуют о том, что синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) обладают более

Таблица 1. Бездатчиковые методы оценивания положения ротора СДПМ
Table 1. Sensorless methods of PMSM rotor position estimation

Традиционные бездатчиковые методы	Бездатчиковые методы, использующие насыщение машины
Метод противоЭДС	Подача высокочастотного напряжения (длительная либо импульсная) на обмотку статора
Метод потокосцеплений	Подача низкочастотного тока на обмотку статора
Табличный метод	Возбуждение за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

высоким КПД в сравнении с синхронными машинами с обмоткой возбуждения и асинхронными машинами из-за высокой коэрцитивной силы постоянных магнитов, однако СДПМ более сложны в управлении. Например, системы векторного управления, получившие широкое распространение в промышленности благодаря спектру решаемых задач, применительно к СДПМ нуждаются в таких параметрах как скорость вращения и угол поворота ротора. Информацию об угле поворота можно получить с датчика положения (оптические и абсолютные энкодеры, позиционные резольверы), установленного непосредственно на валу двигателя, однако установка такого датчика может быть затруднена вследствие конструктивных особенностей электропривода, и даже при наличии датчика положения для вычисления скорости вращения ротора ω необходимо дифференцировать угол поворота θ , а вследствие чего возникающие помехи могут повлиять на управление. Поэтому современные системы управления используют бездатчиковые методы и способы косвенного оценивания недостающих параметров [1]. Существует большое количество методов оценивания положения ротора, которые можно условно разделить на традиционные методы и методы, использующие насыщение машины. Основные бездатчиковые методы оценивания положения ротора СДПМ, разделенные по указанному признаку, приведены в табл. 1 [2].

1. Необходимость оценивания положения неподвижного ротора

Важной задачей управления СДПМ, в частности в системах непрерывного транспорта, является задача плавного пуска. Для ее решения требуется определить начальное положение неподвижного ротора, которое заранее неизвестно. Некоторые производители опускают определение положения ротора при старте, и определяют его с помощью традиционных методов (табл. 1) уже на средних скоростях с помощью различных схем. Например, в системе управления iMotion компании International Rectifier, угловое положение ротора определяется на основе уравнений электрического равновесия обмоток двигателя по осям $\alpha-\beta$, где токи рассчитываются с помощью шунта в звене постоянного тока преобразователя частоты в блоке вычислений фазных токов, а затем по найденному значению угла формируется алгоритм переключения транзисторов [3]. Однако в СДПМ возникает

дополнительный реактивный тормозящий момент, связанный с наличием постоянных магнитов в качестве возбудителя магнитного поля и значительной реакцией якоря из-за высокой коэрцитивной силы магнитов. Взаимная индуктивность M_{AB} и собственные индуктивности L_d, L_q СДПМ изменяются в функции угла отклонения θ . Если ротор относительно статора повернут на угол в диапазоне $0^\circ < \theta < 180^\circ$, то реакция якоря является размагничивающей, реактивный тормозящий момент направлен против пускового, и пусковые процессы ухудшаются. Это может привести к опрокидыванию двигателя, если управление по углу отклонения θ не производится уже на начальном этапе, для чего необходимо проводить оценивание положения неподвижного ротора СДПМ [4].

2. Традиционные бездатчиковые методы оценивания положения ротора

Традиционные косвенные методы оценивания положения ротора связаны с вычислением составляющих вектора противоЭДС двигателя по осям $\alpha-\beta$ неподвижной системы координат, угол которого считается углом отклонения ротора θ . Метод потокосцеплений статора использует фазные потокосцепления по осям $\alpha-\beta$, расчет которых зависит от величины фазных напряжений, токов и индуктивностей. Однако эти методы не подходят для определения положения при нулевой скорости, поскольку противоЭДС в обмотках не наводятся, фазные напряжения равны нулю.

Необходимое положение ротора может быть установлено и вручную перед самым началом работы, а позиционирование ротора производиться по экспериментально составленной таблице. В ней содержится информация о последовательности включения ключей инвертора и скважности, при которых подается напряжение необходимой величины для поворота ротора на заданный угол. Количество возможных начальных положений и время установки ротора зависит от числа полюсов СДПМ, массы ротора и нагрузки на валу [5]. Соответственно, при тяжелых условиях пуска под нагрузкой позиционирование может осуществляться довольно долго, что приводит к излишнему нагреву обмоток, а из-за колебаний при ориентировании ротора в затухающем магнитном поле он способен начать вращение и в обратную сторону, что может быть недопустимо по условиям работы.

3. Современные бездатчиковые методы оценивания положения неподвижного ротора

СДПМ

Поскольку индуктивности СДПМ изменяются в зависимости от положения ротора, насыщение машины и ее явнополосность являются ключевыми параметрами современных бездатчиковых методов оценивания. Наиболее распространенными являются методы, предполагающие подачу на обмотку статора импульсов напряжения или тока различной частоты и длительности. Методы с ШИМ-возбуждением не требуют дополнительных сигналов. Положение ротора оценивается с помощью математической модели СДПМ [6], которая представлена следующим выражением:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_{dq}}{dt} &= \bar{u}_{dq} - r \cdot \bar{i}_{dq} - \omega \kappa (\bar{\Psi}_{dq} + \psi_m); \\ \frac{J}{p^2} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3}{2} i_{dq}^T \kappa (\bar{\Psi}_{dq} + \psi_m) - \frac{M_L}{p}; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{\Psi}_{dq}$, \bar{u}_{dq} , \bar{i}_{dq} – векторы потокосцепления, напряжения и тока статора, вычисленные в системе координат d-q; ψ_m – потокосцепление постоянного магнита; J – момент инерции; r – сопротивление обмоток статора; M_L – момент нагрузки; p – число пар полюсов; $\kappa = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов.

3.1. Длительная подача высокочастотных сигналов

В рамках данного метода дополнительный сигнал, подаваемый на обмотку статора, может иметь синусоидальную, прямоугольную или произвольную форму и прикладываться дополнительно к сигналу несущей частоты [2]. Например, один из методов длительной подачи высокочастотного напряжения представлен в [6], где используется сигнал синусоидальной формы.

Ток по осям d-q изменяется в зависимости от потокосцепления, поскольку изменяются значения взаимной и собственных индуктивностей машины M_{AB} , L_d , L_q при различных положениях ротора θ . Подача сигналов высокой частоты в дополнение к сигналу возбуждения также влияет на значения токов. Выражение для оценивания положения ротора в этом случае, полученное с помощью нелинейного метода наименьших квадратов, выглядит следующим образом [6]:

$$\hat{\theta} = \theta_c + \arg \min_{\mu \in [-\pi, \pi]} \left\| \tilde{i}_{\gamma\delta} - S(\mu, \bar{i}_{\gamma\delta}) \frac{\bar{u}_{\gamma\delta}}{\Omega} \right\|^2, \quad (3)$$

$$S(\mu, \bar{i}_{\gamma\delta}) = M_\mu D L_{dq} (L_{dq}^{-1} (M_\mu^T \bar{i}_{\gamma\delta})) M_\mu^T, \quad (4)$$

где $\hat{\theta}$ – оцененный угол отклонения ротора; μ – угол поворота электрического поля статора; $\bar{i}_{\gamma\delta}$, $\bar{u}_{\gamma\delta}$ – векторы токов и напряжений статора, вычисленные в системе координат $\gamma\delta$ для бездатчикового закона управления с учетом изменяющегося КПД η ; θ_c – угол поворота обобщенного вектора напряжения; $S(\mu, \bar{i}_{\gamma\delta})$ – матрица связи известных параметров θ_c , $\bar{i}_{\gamma\delta}$, \bar{u}_{dq} , \bar{i}_{dq} с неизвестным $\hat{\theta}$; Ω – частота подаваемого сигнала.

Зависимости реального угла θ и оцененного $\hat{\theta}$ в функции времени для явнополосного и неявнополосного СДПМ представлены на рис. 1.

Анализируя данный метод следует отметить, что для выражения $\hat{\theta}$ из начальной модели СДПМ (1) с учетом бездатчикового закона управления и подачи дополнительного сигнала требуется учесть семь неизвестных параметров. Погрешность расчетов сильно зависит от степени насыщения машины и явнополосности: как видно из рис. 1 для явнополосной машины метод является менее точным, поскольку при асимметрии L_d и L_q расчет заметно усложняется.

3.2. Импульсная подача высокочастотных сигналов

При кратковременной подаче высокочастотного импульсного сигнала напряжения на обмотку статора происходит изменение насыщения двигателя за счет возникающих переходных процессов по току. В [7] механизм определения положения ротора с помощью высокочастотных сигналов напряжения (частотой от 0,5 Гц до 2 кГц) состоит в подаче импульса опорного напряжения в фазу А и последующем измерении наведенной ЭДС в фазе В. Исходя из значений наведенных ЭДС и токов вычисляются эквивалентные собственная и взаимная индуктивности фаз А и В:

$$L_A = \frac{e_A}{2\pi f i_A}, \quad (5)$$

$$M_{AB} = \frac{e_B}{2\pi f i_A}, \quad (6)$$

Где f – частота подаваемых импульсов; e_A , e_B , i_A , i_B – наведенные ЭДС и токи фаз А и В соответственно.

Для практического применения эти параметры вычисляются для всех положений ротора с заданным шагом и допустимой погрешностью (в первом приближении достаточно брать шаг равный $22,5^\circ$). По снятым данным составляется таблица индуктивностей.

Алгоритм определения угла отклонения ротора, изложенный в [7] следующий: подается напряжение $U_A = U_m \sin(2\pi ft)$ на фазу А. Если $e_A \cdot e_B < 0$, то угол поворота $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$;

если же $e_A \cdot e_B > 0$, то $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$. В зави-

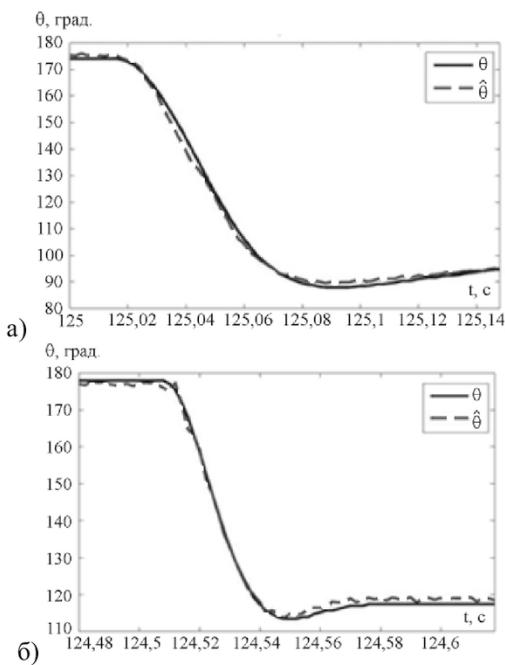


Рис. 1. Переходные процессы $\theta(t)$, $\hat{\theta}(t)$:
а) для неявлнополюсной СДПМ; б) для явнополюсной СДПМ

Fig. 1. Transients of $\theta(t)$, $\hat{\theta}(t)$:
a) for PMSM with non-salient pole; b) for PMSM with salient pole

симости от величин M_{AB} , L_A и тока нагрузки определяется угол поворота ротора по составленной при лабораторных испытаниях таблице, в которой учитывается изменение индуктивностей при протекании тока нагрузки по обмоткам. По вычисленным индуктивностям можно оценить только пространственное положение осей ротора. Необходимо также определить полярность магнитного потока, чтобы установить, в каком именно диапазоне ($0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ или $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$) находится ротор. Полярность магнитов определяется при подаче двух последовательных импульсов напряжения с противоположными знаками в обмотку, одна из которых уменьшает насыщение сердечника, а другая – увеличивает его. Импульсы необходимо подавать таким образом, чтобы ток упал до нуля прежде, чем на обмотку поступит следующий импульс. Амплитуда импульсов должны быть достаточно большой, чтобы магнитный материал изменил свои магнитные свойства.

В [1], где также рассматривается высокочастотная подача импульсов напряжения для косвенного оценивания угла отклонения ротора θ используется следующая расчетная формула:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{2 \cdot \left(-0,5 - \frac{u_A}{u_B} \right)}{\sqrt{3}} \right), \quad (7)$$

где u_A , u_B – напряжения фаз А и В соответственно.

На рис. 2 представлены графики изменения угла поворота ротора по методу [1]. Погрешность возникает преимущественно из-за запаздывания по времени на вычисления оцениваемого сигнала. Средняя погрешность оценивания равна 4,95 %.

3.3. Подача низкочастотных сигналов тока

При использовании тестовых низкочастотных сигналов тока, на двигатель подаются сигналы такой частоты, которая находится в пределах про-

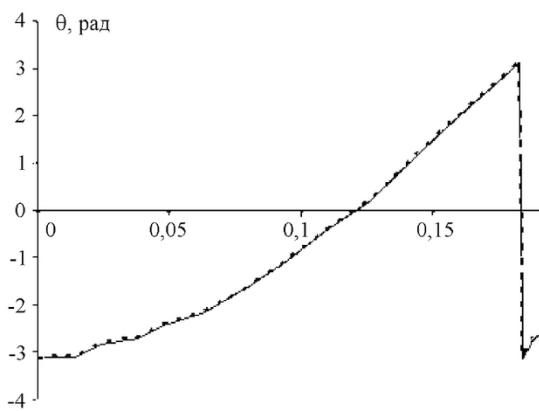


Рис. 2. Переходные процессы: $\theta(t)$ – сплошная линия, $\hat{\theta}(t)$ – пунктирная линия

Fig 2. Transients of $\theta(t)$ depicted by solid line and $\hat{\theta}(t)$ depicted by dashed line

пускающей способности механической подсистемы [8]. Для СДПМ, работающих на стандартной частоте 50 Гц, такая частота равна 25-50 Гц. При подаче дополнительных низкочастотных токовых сигналов на обмотку статора возникают слабые колебания момента и колебания скорости ротора, вызывающие пульсации напряжения в обмотке ротора. Анализируя информацию, снятую с датчика напряжения, можно рассчитать положение осей ротора. Однако при подаче низкочастотного токового сигнала нельзя определить полярность магнитного потока, поэтому данный метод зачастую используют в совокупности с подачей сигналов более высокой частоты, при которой изменяются магнитные свойства СДПМ. Этому случаю определение полярности магнитов основывается на наблюдении знака второй гармоники опорного напряжения статора. Таким образом, при обработке токов статора решаются две основные задачи: управление подачей тестовых токовых сигналов различной частоты и последующее спектральное разложение отклика по напряжению. Максимальная погрешность при начальном определении по-

ложении ротора составляет ± 15 эл. град. Преимущество метода состоит в том, что при подаче низкочастотных сигналов не возникает значительных шумов, однако время оценивания относительно велико, что приводит к большой погрешности в динамике.

4. ШИМ-возбуждение без дополнительных сигналов

В методах с возбуждением посредством ШИМ оценивание положения ротора производится так же, как в методах с подачей импульсов, в которых используются фазные напряжения. Основным преимуществом данного метода является отказ от дополнительных тестовых сигналов, из-за которых возникают дополнительные пульсации тока и потери на переключение.

Наиболее простым является метод производной нулевого вектора напряжения [9], при котором не вносятся никаких изменений в стандартную ШИМ. Положение ротора оценивается по различным комбинациям производных токов, которые возникают в ответ на конкретные значения напряжений. Основную информацию для алгоритма получают из тока, являющегося реакцией на вектор напряжения нулевой последовательности, который вычисляется численным дифференцированием по двум предшествующим значениям тока по общей формуле:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_d}{dt} &= \frac{R}{L_d L_q} (((L_d - L_q) \cos(\lambda_e)^2 - L_d) \hat{i}_d - \\ &- (L_d - L_q) \sin(\lambda_e) \cos(\lambda_e) \hat{i}_q) - \sin(\lambda_e) \frac{k_e \omega}{L_q}; \\ \frac{d\hat{i}_q}{dt} &= \frac{R}{L_d L_q} ((L_d - L_q) \sin(\lambda_e) \cos(\lambda_e) \hat{i}_d + \\ &- ((L_d - L_q) \cos(\lambda_e)^2 + L_q) \hat{i}_q) - \cos(\lambda_e) \frac{k_e \omega}{L_q}, \end{aligned} \quad (8)$$

где λ_e – угол рассогласования между реальным положением системы координат d-q и положением системы координат оценивания; \hat{i}_d , \hat{i}_q – значения оцениваемых токов; k_e – постоянная противоЭДС.

Поскольку для периода ШИМ при таком подходе требуется четыре значения тока, частота дис-

кретизации АЦП всего в четыре раза больше частоты переключения ШИМ. Однако при стандартном ШИМ-возбуждении трудно гарантировать постоянную продолжительность времени действия вектора напряжения, поскольку рабочий цикл ШИМ зависит от частоты опорного напряжения. Для решения этой проблемы в качестве пульсирующего вектора, вращающегося синхронно основным вектором напряжения, рассматривают вторую гармонику напряжения, имеющую большую амплитуду. При данном методе для оценивания положения ротора не требуется сложного математического аппарата, а его точность не зависит от изменения параметров насыщения. Оборудование не требует использования каких-либо дополнительных датчиков помимо тех, что присутствуют в системе векторного управления по умолчанию. Единственным обязательным условием является наличие разницы в значениях полного сопротивления двигателя в осях d-q для расчета сигнала рассогласования $\frac{d\hat{i}_d}{dt}$ и $\frac{d\hat{i}_q}{dt}$.

Заключение

Традиционные бездатчиковые методы оценивания положения ротора, такие как методы противоЭДС и потокосцеплений не подходят для оценивания на скоростях близких к нулю, поскольку фазные напряжения и противоЭДС не наводятся. Установка ротора СДПМ в начальное положение вручную осложняется высокой коэрцитивной силой магнитов, затрудняющей позиционирование ротора.

Современные бездатчиковые методы используют косвенное вычисление положения ротора из математической модели СДПМ, параметры которой зависят от явнополюсности и насыщения машины. При использовании высокочастотных тестовых сигналов результатирующий сигнал тока искажается из-за эффектов наложения, а также возникающих шумов. Для точного оценивания требуется учесть множество факторов, что усложняет математический аппарат, особенно для явнополюсных машин с несимметричным распределением индуктивностей. Данные методы не требуют сложного технического оснащения, а погрешность их вычислений преимущественно зависит от скорости оценивания и отклика системы. При использовании низкочастотных тестовых сигналов высо-

Таблица 2. Сравнение бездатчиковых методов оценки неподвижного положения ротора

Table 2. Characteristic comparison of sensorless methods of standstill rotor position estimation

Бездатчиковый метод	Подача высокочастотных сигналов		Подача низкочастотного тока	ШИМ-возбуждение
	Длительных	Импульсных		
Сложность технического исполнения	низкая	средняя	средняя	средняя
Пульсации тока и момента	высокие	высокие	низкие	высокие
Скорость оценивания	низкая	средняя	низкая	низкая
Точность оценивания	высокая	средняя	низкая	низкая

кочастотные компоненты отсутствуют, однако сам алгоритм оценивания имеет сравнительную большую продолжительность, что влияет на точность измерений. При ШИМ-возбуждении возникают потери, связанные с переключением и пульсациями сигнала, однако техническое исполнение не нуждается в дополнительных датчиках и аппаратных средствах, и реализуется на базе уже имеющейся системы векторного управления. Скорость оценивания высока, однако данный метод не гарантирует высокую точность, поскольку в нем не

задействуются параметры насыщения машины. Обобщенные результаты анализа сведены в табл. 2.

Таким образом, выбор бездатчикового метода оценивания положения неподвижного ротора полностью зависит от требований, которые предъявляются к сложности технического исполнения, а, соответственно, и стоимости оборудования, к допустимым по условиям работы пульсациям тока и момента, скорости и точности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лицин, К.В. Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора синхронного двигателя/ К. В. Лицин, С.Н. Басков// Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 28-33.
- A. Ravikumar Setty. Comparison of High Frequency Signal Injection Techniques for Rotor Position Estimation at Low Speed to Standstill of PMSM/A. Ravikumar Setty, Shashank Wekhande, Kishore Chatterjee// Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on. – V.1.
- Румянцев, М. Управление вентильными двигателями на базе системы iMotion компании International Rectifier/ М. Румянцев, А. Сизякин// Силовая электроника. – электр. науч. дан. – 2012. – №.2 – режим доступа: http://www.power-e.ru/2012_2_38.php. – [30.12.2016]
- Тарнецкая А.В. Проблемы моделирования пуска синхронных двигателей с постоянными магнитами [Электронный ресурс]/ А.В. Тарнецкая, И.Ю.Семыкина// Сборник материалов всероссийской научно-практической школы «Энергостарт». – 2016. Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/es/energstart/pages/Articles/3/Tarnetckaia_Semykina.pdf. – [25.08.2016]
- R.Chakirov. Sensorless Detection of Rotor Position of PMBL Motor at Stand Still/R.Chakirov, Yu.Vagapov, A. Gaede//Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007. – v.1. p.411-414.
- Jebai Al Kassem. Sensorless position estimation of Permanent-Magnet Synchronous Motors using a saturation model/ Al Kassem J., Malrait F., Martin P. and Rouchon P. // Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on. 2012.
- W.N. Fu/Design of Position Detection Strategy of Sensorless Permanent -Magnet Motors at Standstill Using Transient Finite Element [электронный ресурс]/ W.N. Fu, S. L. Ho, Zh. Zhang// ANSYS 2011 中国用户大会优秀论文. – режим доступа: <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS%20China/staticassets/support/低频/10%20Design%20of%20Position%20Detection%20Strategy%20of%20Sensorless%20Perma.pdf>
- D. Basic.Initial Rotor Position Detection in PMSM based on Low Frequency Harmonic Current Injection/ Basic, D. , F. Maltrait, Rouchon P. //14th International Power Electronics and Motion Control Conference. – режим доступа: http://cas.ensmp.fr/~rouchon/publications/PR2010/PEMCC2010_HarmInjection.pdf
- Raute R. A Zero Speed Operation Sensorless PMSM Drive Without Additional Test Signal Injection/ Raute R., Caruana C., Cilia J., Staines C.S., Sumner M./ European Conference on Power Electronics and Applications. 2012. pp 1-10.

REFERENCES

- Litsin. K.V., Baskov S.N. Vysokochastotnaya injektsiya sygnalov pri bezdatchikovom metode opredeleniya polojeniya rotora sinhronnogo dvigatelya [The high-frequency signal injection for sensorless method for determining the angular rotor of the synchronous motors]. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2013. №1.
- A. Ravikumar Setty. Comparison of High Frequency Signal Injection Techniques for Rotor Position Estimation at Low Speed to Standstill of PMSM/A. Ravikumar Setty, Shashank Wekhande, Kishore Chatterjee// Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on. – V.1.
- Rumyantsev M, Sizyakin A. Upravlenie ventilnymi dvigateleyami na baze sistemy iMotion kompanii International Rectifier [Brushless motor control based on International Rectifier company's iMotion system]. Sylovaya Electronika.2012.№2.
- Tarnetskaya A.V. Problemy modelirovaniya puska sinhronnyh dvigateley s postoyannymi magnitami [Problems of permanent-magnet synchronous machine start modeling]

5. R.Chakirov. Sensorless Detection of Rotor Position of PML Motor at Stand Still/R.Chakirov, Yu.Vagapov, A. Gaede//Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007. – v.1. p.411-414.
6. Jebai Al Kassem. Sensorless position estimation of Permanent-Magnet Synchronous Motors using a saturation model/ Al Kassem J., Malrait F., Martin P. and Rouchon P. // Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on. 2012.
7. W.N. Fu/Design of Position Detection Strategy of Sensorless Permanent -Magnet Motors at Standstill Using Transient Finite Element [электронный ресурс]/ W.N. Fu, S. L. Ho, Zh. Zhang// ANSYS 2011 中国用户大会优秀论文. – режим доступа: <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS%20China/staticassets/support/低频/10%20Design%20of%20Position%20Detection%20Strategy%20of%20Sensorless%20Perma.pdf>
8. D. Basic.Initial Rotor Position Detection in PMSM based on Low Frequency Harmonic Current Injection/ Basic, D. , F. Maltrait, Rouchon P. //14th International Power Electronics and Motion Control Conference. – режим доступа: http://cas.ensmp.fr/~rouchon/publications/PR2010/PEMCC2010_HarmInjection.pdf
9. Raute R. A Zero Speed Operation Sensorless PMSM Drive Without Additional Test Signal Injection/ Raute R., Caruana C., Cilia J., Staines C.S., Sumner M.// European Conference on Power Electronics and Applications. 2012. pp 1-10.

Поступило в редакцию 08.03.2017

Received 08.03.2017