

Шарафутдинов Глеб Эдуардович, Аспирант,  
Казанский Государственный Энергетический Университет

Малев Николай Анатольевич,  
к.т.н. по научной специальности 05.09.01.  
Доцент по специальности Электротехнические комплексы и системы,  
Казанский Государственный Энергетический Университет

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В УСЛОВИЯХ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Аннотация.** В работе рассматривается задача оценивания электромагнитных параметров синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) при функционировании в составе бездатчиковой системы векторного управления. Показано, что отсутствие информации о механических координатах ротора создаёт дополнительные трудности при параметрической идентификации, приводя к смещению оценок и снижению точности наблюдателей состояния. Предлагается подход, базирующийся на совместном применении аппарата функций чувствительности и рекурсивного метода наименьших квадратов, позволяющий частично компенсировать влияние ошибки оценки положения. Приведены результаты имитационного моделирования, подтверждающие работоспособность метода в условиях варьирования нагрузки и температуры.

**Ключевые слова:** Синхронный двигатель с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, идентификация параметров, рекурсивный метод наименьших квадратов, функции чувствительности, наблюдатель состояния.

### 1. Введение

Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов заняли прочные позиции в современных электроприводах ответственного назначения – от прецизионных сервосистем до тяговых приводов электротранспорта. Их преимущества, связанные с высокой энергетической эффективностью и удельной мощностью, реализуются в полной мере лишь при условии точной настройки контуров векторного управления. Последнее, в свою очередь, требует достоверного знания электромагнитных параметров машины: омического сопротивления статорных обмоток, синхронных индуктивностей по продольной и поперечной осям, а также потокосцепления, создаваемого магнитами ротора [1, 2, 3].

Практика эксплуатации показывает, что перечисленные параметры не являются постоянными величинами. Тепловой дрейф, магнитное насыщение, старение магнитов и развитие дефектов приводят к их отклонениям от номинальных значений, достигающим 20–30%. В результате настройки регуляторов, выполненные для паспортных значений, перестают обеспечивать требуемое качество переходных процессов, а в ряде случаев – и устойчивость системы [4].

Ситуация осложняется, когда электропривод строится по бездатчиковой схеме. Отказ от датчика механического положения ротора, продиктованный соображениями стоимости, надёжности или конструктивными ограничениями, приводит к тому, что алгоритм управления вынужден опираться исключительно на измерения фазных токов и напряжений [4, 10, 11]. В этих условиях задача идентификации параметров приобретает характер взаимосвязанной проблемы: параметры нужны для точной оценки положения, а сама оценка положения необходима для корректного вычисления параметров [11, 12]. Возникает своего рода замкнутый круг, преодоление которого требует специальных методических решений.



В работах сотрудников кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета, в частности Н. А. Малёва и О. В. Козелкова, развивается направление, связанное с применением градиентных алгоритмов и аппарата функций чувствительности для параметрической идентификации электромеханических преобразователей [5, 6, 7, 8]. Настоящая работа развивает указанный подход применительно к специфике бездатчикового управления СДПМ.

## 2. Математическая модель СДПМ в осях d-q

Для синтеза алгоритмов идентификации традиционно используется модель СДПМ в ортогональной системе координат d-q, ориентированной по вектору потокоцепления ротора [9]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_e L_q i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e (L_d i_{sd} + \psi_m) \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_s$  – активное сопротивление обмоток статора;  $L_d, L_q$  – индуктивности по осям d и q;  $\psi_m$  – потокоцепление постоянных магнитов;  $\omega_e$  – электрическая угловая скорость.

В бездатчиковой системе управления переменная  $\omega_e$  не измеряется непосредственно, а восстанавливается наблюдателем [11]. Ошибка оценивания скорости, обозначаемая далее как  $\Delta\omega_e$ , входит в уравнения (1) и приводит к появлению дополнительного возмущающего воздействия.

$$\Delta u_{sq} = \Delta\omega_e (L_d i_{sd} + \psi_m) \quad (2)$$

Именно это слагаемое является источником смещения оценок параметров при использовании стандартных алгоритмов идентификации, поскольку оно неразлично с изменениями самих параметров в рамках одного уравнения [11, 12].

## 3. Проблема параметрической идентификации при бездатчиковом управлении

Классический подход к идентификации параметров СДПМ предполагает наличие информации о положении и скорости ротора, получаемой от датчика [2]. В этом случае система уравнений (1) может быть преобразована к регрессионной форме, и для оценивания вектора параметров  $\theta = [R_s, L_d, L_q, \psi_m]^T$  успешно применяются рекурсивные алгоритмы, в частности метод наименьших квадратов [9].

В бездатчиковом варианте ситуация принципиально меняется. Во-первых, регрессор  $\phi(k)$  формируется с использованием оценок

$\hat{\omega}_e$  и  $\hat{\theta}_e$ , которые сами зависят от текущих оценок параметров [11]. Во-вторых, как показано в работе [10], одновременная идентификация всех четырёх параметров из уравнений статорных цепей оказывается невозможной без привлечения дополнительной информации – задача становится плохо обусловленной.

Анализ литературы позволяет выделить несколько стратегий преодоления указанных трудностей [4, 10, 11]. Первая связана с разделением процедуры идентификации на этапы, каждый из которых ориентирован на оценку ограниченного числа параметров в условиях, когда влияние остальных минимизировано. Вторая предполагает введение тестовых воздействий – инъекции высокочастотных сигналов или смещений положения – которые делают систему уравнений полной [11]. Третья опирается на использование дополнительных измерений, например момента на валу, что, однако, противоречит идеологии бездатчикового управления.

Представляется, что наиболее практичным компромиссом является комбинирование первой и второй стратегий: поэтапная идентификация с разделением параметров по частотным диапазонам, дополненная короткими тестовыми воздействиями, не нарушающими нормального функционирования привода [10].



#### 4. Метод идентификации на основе функций чувствительности и градиентного алгоритма

Развивая подход, предложенный в работах Н. А. Малёва и его коллег для электроприводов постоянного тока и асинхронных машин [5, 6, 7], применим аппарат функций чувствительности к задаче идентификации СДПМ.

Функция чувствительности передаточной функции  $W(s)$  по параметру  $b$  определяется как [1, 7]:

$$S_b^W(s) = \frac{\partial W(s)}{\partial b} \cdot \frac{b}{W(s)} \quad (3)$$

Для передаточной функции статорной цепи по оси  $d$ , имеющей вид  $W(s) = 1/(L_d s + R_s)$ , выражения для чувствительности к активному сопротивлению и индуктивности записываются следующим образом [1]:

$$S_{R_s}(s) = -\frac{R_s}{L_d s + R_s}, S_{L_d}(s) = -\frac{L_d s}{L_d s + R_s} \quad (4)$$

Анализ логарифмических амплитудно-частотных характеристик, построенных на основе (4), показывает, что вклад активного сопротивления доминирует в низкочастотной области, тогда как индуктивность определяет поведение системы на высоких частотах. Это создаёт предпосылки для раздельной оценки параметров путём выбора соответствующих частотных диапазонов тестовых сигналов [1].

Предлагаемая процедура включает три этапа.

**Этап 1. Оценка постоянной времени.** На обмотку статора по оси  $d$  подаётся ступенчатое напряжение. Переходный процесс тока аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, из которой определяется электромагнитная постоянная времени  $T_d$ . Проведение эксперимента при пониженном напряжении звена постоянного тока позволяет ослабить искажения, вносимые «мёртвым» временем силовых ключей [1].

**Этап 2. Оценка индуктивности.** При подаче тестового сигнала на частоте, существенно превышающей граничную частоту  $\omega_{cr} = R_s/L_d$ , реактивное сопротивление становится доминирующим. В этих условиях индуктивность вычисляется по соотношению [1]:

$$L_d \approx \frac{U_{dm}}{I_{dm} \cdot \omega_e} \quad (5)$$

где  $U_{dm}$  и  $I_{dm}$  – амплитудные значения соответствующих гармоник.

**Этап 3. Вычисление активного сопротивления.** После определения  $L_d$  и  $T_d$  сопротивление находится как [1]:

$$R_s = \frac{L_d}{T_d} \quad (6)$$

Для оценивания параметров в реальном времени используется рекурсивный метод наименьших квадратов [9]. Дискретная модель представляется в форме линейной регрессии:

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta + e(k) \quad (7)$$

Обновление оценок производится по стандартным рекуррентным соотношениям [9, 12]:

$$K(k) = \frac{P(k-1) \varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \quad (8)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) [y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1)] \quad (9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент забывания, обеспечивающий адаптацию к дрейфующим параметрам.

Существенным элементом предлагаемого метода является компенсация влияния ошибки оценивания скорости. Поскольку регрессор  $\varphi(k)$  формируется с использованием  $\hat{\omega}_e$ , в него вносится поправка, учитывающая априорную оценку  $\Delta\omega_e$  на основе анализа невязки между измеренными и модельными токами. Данная процедура развивает идеи, изложенные в работах сотрудников кафедры ПМ КГЭУ [6, 8].



### 5. Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предложенного метода была разработана имитационная модель в среде MATLAB/Simulink. В качестве объекта исследования использовалась модель СДПМ со следующими номинальными параметрами:  $R_s=0,165\text{ Ом}$ ,  $L_d=0,43\text{ мГн}$ ,  $L_q=0,46\text{ мГн}$ ,  $\psi_m=0,1\text{ Вб}$ . Модель дополнена наблюдателем скорости на основе расширенного фильтра Калмана [12] и блоком идентификации, реализующим алгоритм (8)–(9).

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе исследовалась работа алгоритма при наличии датчика скорости – для верификации базовой процедуры. На втором этапе датчик отключался, и идентификация выполнялась в условиях бездатчикового управления [11].

Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты идентификации параметров СДПМ

| Параметр      | Истинное значение | Оценка при наличии датчика | Погрешность | Оценка без датчика | Погрешность |
|---------------|-------------------|----------------------------|-------------|--------------------|-------------|
| $R_s$ , мОм   | 165               | 172                        | 4,2 %       | 181                | 9,7 %       |
| $L_d$ , мГн   | 0,43              | 0,442                      | 2,8 %       | 0,455              | 5,8 %       |
| $L_q$ , мГн   | 0,46              | 0,471                      | 2,4 %       | 0,483              | 5,0 %       |
| $\psi_m$ , Вб | 0,1               | 0,098                      | 2,0 %       | 0,094              | 6,0 %       |

Как видно из таблицы, переход к бездатчиковому режиму приводит к увеличению погрешности оценивания, что является ожидаемым следствием влияния ошибки наблюдателя скорости [11]. Тем не менее, относительная погрешность остаётся в пределах 10 %, что для задач диагностирования и адаптивной настройки регуляторов может считаться приемлемым [12].

Важно отметить, что систематическая составляющая погрешности, связанная с оценкой  $R_s$  и  $\psi_m$ , имеет тенденцию к накоплению при длительной работе. Для её компенсации предлагается периодическое проведение коротких тестовых сессий с инъекцией высокочастотного сигнала по оси  $d$ , что позволяет уточнить базовые значения параметров без существенного нарушения рабочего режима [1, 11].

### 6. Обсуждение и практические аспекты

Предложенный метод обладает рядом особенностей, которые следует учитывать при его практической реализации.

Во-первых, эффективность идентификации существенно зависит от качества работы наблюдателя скорости. Если наблюдатель обеспечивает оценивание  $\omega_e$  с погрешностью, превышающей 5–7 %, точность идентификации параметров может оказаться недопустимо низкой [11]. Это выдвигает повышенные требования к синтезу наблюдателя и обосновывает целесообразность применения робастных алгоритмов, например на основе скользящих режимов [12] или расширенного фильтра Калмана [12].

Во-вторых, разделение параметров по частотным диапазонам требует организации тестовых воздействий. В условиях нормальной эксплуатации это означает необходимость введения в алгоритм управления специальных режимов, длительность и периодичность которых определяются требованиями к точности и допустимым уровнем возмущений [10]. Представляется перспективным использование естественных переходных процессов – пусков, набросов нагрузки, торможений – в качестве источников информации для идентификации [4].

В-третьих, предложенный подход хорошо согласуется с концепцией тестового диагностирования, развиваемой в работах сотрудников кафедры «Приборостроение и мехатроника» КГЭУ [5, 6, 7, 8]. Идентифицированные параметры могут служить основой для



формирования системы диагностических признаков, позволяющей обнаруживать развивающиеся дефекты на ранних стадиях [6].

Следует также отметить, что использование аппарата функций чувствительности не ограничивается задачей разделения параметров по частоте. Данный инструмент позволяет количественно оценить влияние каждого параметра на выходные координаты системы, что открывает возможности для целенаправленного выбора структуры тестовых сигналов и оптимизации процедуры идентификации [7].

#### 7. Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации параметров СДПМ в условиях бездатчикового векторного управления. Показано, что основным источником погрешности является взаимосвязь между оценками параметров и оценкой скорости ротора. Предложен метод, основанный на совместном применении аппарата функций чувствительности и рекурсивного алгоритма наименьших квадратов, позволяющий частично компенсировать влияние указанной взаимосвязи [5, 6].

Результаты имитационного моделирования демонстрируют, что предложенный подход обеспечивает оценивание активного сопротивления, индуктивностей и потокоцепления магнитов с погрешностью, не превышающей 10 % в бездатчиковом режиме [12]. Это создаёт предпосылки для использования метода в системах адаптивного управления и технического диагностирования электроприводов [6].

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку робастных алгоритмов наблюдателя скорости, обеспечивающих повышенную точность оценивания в широком диапазоне режимов [11], а также на экспериментальную верификацию метода на физическом стенде с СДПМ.

#### *Список литературы:*

1. Авдеев А. С., Осипов О. И. Идентификация параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе их частотного анализа // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 180, № 1. – С. 38–46.
2. Базылев Д. Н., Бобцов А. А., Пыркин А. А., Чежин М. С. Алгоритмы идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 8. – С. 523–531.
3. Беспалов В. В. Исследование методов оценивания переменных состояний и постоянных параметров синхронного двигателя // Научно-технический вестник ИТМО. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 45–52.
4. Иванов Д. А., Соловьев С. А. Обзор методов бездатчикового управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // Электротехника. – 2022. – № 6. – С. 12–19.
5. Малёв Н. А., Погодицкий О. В., Козелков О. В., Малацион А. С. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 56–68.
6. Малёв Н. А., Козелков О. В., Погодицкий О. В. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 89–101.
7. Малёв Н. А., Погодицкий О. В., Любарчук Ф. Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 7–22.



8. Поляков А. Л., Козелков О. В. Методы параметрической идентификации в задачах управления электроприводами // Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК. – 2021. – С. 145–152.

9. Толочко О. И. Идентификация индуктивностей синхронного двигателя с постоянными магнитами рекуррентным методом наименьших квадратов // Научные труды ДонНТУ. – 2012. – № 1 (12)-2 (13). – С. 235–238.

10. Шрейнер Р. Т., Дмитриенко Ю. А. Идентификация параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами в составе бездатчиковых электроприводов // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 2 (47). – С. 28–35.

11. Online Parameter Identification of SPMSMs Under Sensorless Control Cancelling Influence of Position Error With Torque Measurements // IET Electric Power Applications. – 2026. – Vol. 20, No. 5. – P. 1–14.

12. PMSM sensorless control based on super-twisting algorithm sliding mode observer with the IAORLS parameter estimations // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 04030.

