

Шарафутдинов Глеб Эдуардович,
Аспирант, Университет КГЭУ

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

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СДПМ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА И ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. В настоящей работе предложен подход к определению электрических параметров синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), базирующийся на совместном использовании частотных методов и теории чувствительности. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является возможность раздельной оценки активного сопротивления и индуктивных параметров обмоток статора благодаря выбору тестовых частот, на которых нелинейные искажения, вносимые силовым преобразователем и насыщением магнитопровода, оказываются минимальными. Приведено математическое обоснование метода, детализирована поэтапная процедура вычисления параметров, а также представлены результаты экспериментальной проверки, подтверждающие работоспособность и достаточную точность подхода для задач технического диагностирования.

Ключевые слова: Идентификация параметров, СДПМ, синхронный двигатель с постоянными магнитами, частотный метод, функция чувствительности, тестовая диагностика, рекурсивный алгоритм.

1. Введение

В современных высокотехнологичных отраслях – электромобилестроении, авиационной и робототехнической промышленности, нефтегазовом машиностроении – всё более широкое распространение получают синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Эти машины востребованы в системах, где внезапный отказ может повлечь значительные материальные потери или создать аварийную ситуацию. Эффективность векторного управления и общая надежность электроприводов такого типа в значительной степени определяются точностью априорного знания их электромагнитных параметров: омического сопротивления статорных обмоток R_s , синхронных индуктивностей по продольной и поперечной осям L_d и L_q , а также потокоцепления, создаваемого магнитами ротора Ψ_m [1].

Реальные условия эксплуатации приводят к тому, что перечисленные параметры могут отклоняться от номинальных значений на 20–30% вследствие теплового дрейфа, насыщения магнитной цепи, старения магнитов или развития дефектов. Указанное обстоятельство делает задачу оперативной параметрической идентификации неотъемлемой частью проблемы диагностирования технического состояния СДПМ [2].

Обзор доступных методов идентификации позволяет выделить их ключевые ограничения. Подходы, использующие исключительно каталожные сведения, характеризуются значительной погрешностью, достигающей 30% [3]. Интеллектуальные стратегии, включая нейросетевые и эволюционные алгоритмы, требуют существенных вычислительных мощностей и времени для обучения [4]. Наиболее привлекательными с позиций реализации в реальном времени выглядят аналитические методы (рекурсивный метод наименьших квадратов, фильтр Калмана, наблюдатели состояния), обеспечивающие оптимальный баланс между точностью и вычислительной сложностью [5].



В публикации [1] был предложен подход к оценке неизвестных параметров СДПМ, использующий частотный анализ и функции чувствительности. Данный метод позволяет снизить влияние нелинейностей и достичь погрешности в пределах 5%. Настоящая работа развивает указанный подход применительно к задачам мониторинга качества функционирования электропривода и его дискретной реализации в системах управления.

2. Теоретические основы метода

2.1. Математическая модель СДПМ

Динамика СДПМ наиболее наглядно описывается в ортогональной системе координат d - q , жестко связанной с роторной осью [6]:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s I_{sd} + L_d \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_e L_q I_{sq} \\ U_{sq} = R_s I_{sq} + L_q \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_e (L_d I_{sd} + \Psi_m) \end{cases} \quad (1)$$

При переходе в область изображений передаточная характеристика для цепи статора по оси d принимает вид [1]:

$$W_{U,i}(s) = \frac{I_{sd}(s)}{U_{sd}(s)} = \frac{1}{L_d s + R_s} \quad (2)$$

Данное выражение служит базовым при последующем анализе чувствительности и выборе режимов тестирования.

2.2. Аппарат функций чувствительности

Оценка влияния вариаций параметров на динамические свойства системы производится с использованием функций чувствительности. Относительная чувствительность представляет собой меру изменения передаточной функции при вариации параметра и вычисляется как [7]:

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

Применительно к рассматриваемому объекту для омического сопротивления и индуктивности продольной оси функции чувствительности записываются следующим образом [1]:

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

$$S_{R_s}(s) = -\frac{R_s}{L_d s + R_s} \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что они имеют полюс, определяемый электромагнитной постоянной времени, что создает основу для частотного разделения параметров.



2.3. Выбор частотных интервалов и минимизация искажений

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики, построенные на основе функций чувствительности, выявляют следующую закономерность [1]:

1. Вклад активного сопротивления в формирование отклика доминирует в диапазоне низких частот – вплоть до граничной частоты $\omega_{ср}=R/L$.
2. Индуктивная составляющая становится определяющей на высоких частотах, превышающих $\omega_{ср}$.
3. Искажения, вносимые «мертвым» временем инвертора, локализованы преимущественно в низкочастотной области [1].
4. Нелинейность кривой намагничивания влияет на оценку индуктивностей в высокочастотной зоне, однако подбором тестового сигнала это влияние можно ослабить [1].

Таким образом, ключевая идея метода состоит в том, что селекция параметров по частоте позволяет проводить их независимое вычисление. Использование тестовых воздействий на повышенных частотах создает условия, при которых погрешности от «мертвого» времени и гистерезисных явлений минимизируются [1].

3. Алгоритм поэтапного вычисления параметров

Разработанная вычислительная процедура основывается на положениях работ [1, 8] и ориентирована на использование в системах реального времени.

Этап 1. Определение электромагнитной постоянной времени

На обмотку по продольной оси подается ступенчатое напряжение. Огибающая переходного процесса тока статора анализируется путем аппроксимации экспоненциальной кривой, что позволяет определить постоянную времени T_d . Важно отметить, что проведение эксперимента при пониженном напряжении звена постоянного тока (высокой скважности ШИМ) позволяет свести к минимуму искажения, обусловленные «мертвым» временем силовых ключей [1].

В условиях нелинейной магнитной системы оцененная постоянная времени коррелирует со статической, а не дифференциальной индуктивностью, что снижает методическую погрешность [1].

Этап 2. Вычисление индуктивности по оси d

При воздействии тестовым сигналом высокой частоты (существенно превышающей $\omega_{ср}$) реактивное сопротивление становится доминирующим фактором, что позволяет пренебречь влиянием омической составляющей. В этом случае расчет индуктивности ведется по соотношению [1]:

$$L_d \approx \frac{U_{dm}}{I_{dm} \cdot \omega_e} \quad (6)$$

где индексы «m» обозначают амплитудные значения соответствующих гармоник. Высокая частота испытательного воздействия гарантирует нечувствительность результата к «мертвому» времени и насыщению [1].

Этап 3. Уточнение величины активного сопротивления

Получив численное значение L_d и постоянную времени T_d , активное сопротивление определяется из очевидного соотношения [1]:

$$R_s = \frac{L_d}{T_d} \quad (7)$$



Влияние потерь в стали на полученный результат компенсируется с использованием моделей чувствительности, адаптированных под конкретный частотный диапазон [8].

Идентификация параметров поперечной оси q осуществляется по аналогичной схеме, поскольку высокая частота теста и инерционность механических процессов обеспечивают независимость осей [1].

3.1. Дискретная имплементация на базе RLS

Для обеспечения работы в режиме реального времени предлагается использовать рекуррентный метод наименьших квадратов (RLS) [9].

Дискретный аналог модели СДПМ может быть представлен в форме [9]:

$$\mathbf{y}(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (8)$$

Где вектор искомых параметров $\boldsymbol{\theta} = [R_s, L_d, L_q]^T$; $\boldsymbol{\varphi}(k)$ – вектор регрессоров, формируемый на основе текущих измерений токов и напряжений.

Классическая RLS-процедура обновления оценок включает следующие шаги [9]:

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (9)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)] \quad (11)$$

Выбор коэффициента забывания $\lambda \in (0,1]$ определяется требуемой скоростью слежения за дрейфующими параметрами.

4. Имитационное моделирование и экспериментальная апробация

4.1. Конфигурация моделируемой системы

В качестве базового элемента имитационной модели использован стандартный блок «Permanent Magnet Synchronous Machine» библиотеки Simscape / Sim Power Systems, реализующий систему уравнений (1) [10]. Настройка блока осуществлена в соответствии с параметрами реального двигателя.

4.2. Архитектура модели в MATLAB/Simulink

Таблица 1

Разработанная Simulink-модель включает следующие функциональные модули [10]:

Компонент	Назначение
Модель СДПМ (PMSM)	Объект идентификации с параметрами из табл. 1
Инвертор напряжения	Формирование тестовых сигналов с возможностью учета «мертвого» времени
Блок RLS-идентификации	Реализация алгоритмов (9)– (11)
Эталонная модель	Модель с паспортными значениями для сравнения
Диагностический модуль	Построение признакового пространства

4.3. Анализ полученных результатов

В ходе верификации использовались экспериментальные данные, представленные в работе [1]. Характеристики объекта исследования сведены в таблицу.



Таблица 2

Паспортные данные исследуемого двигателя:

Параметр	Величина
Выходная мощность, кВт	5,5
Линейное напряжение, В	110
Номинальный ток, А	14,1
Напряжение звена ПТ, В	311
«Мертвое» время инвертора, мкс	1
Сопротивление статора R_s , мОм	165
Индуктивность L_d , мГн	0,43
Индуктивность L_q , мГн	0,46
Потокосцепление Ψ_m , Вб	0,1

Таблица 3

Результаты, полученные на первом этапе (при напряжении ЗПТ 72 В) [1]:

Оцениваемый параметр	Расчетное значение	Реальное значение	Отклонение, %
Индуктивность L_d	0,4488 мГн	0,43 мГн	4,4
Сопротивление R_s	178 мОм	165 мОм	7,9
Постоянная T_d	2,519 мс	2,606 мс	< 5

Влияние эффекта «мертвого» времени [1]: повышение напряжения ЗПТ до 312 В приводит к катастрофическому росту погрешностей – для индуктивности до 36,48%, для сопротивления – до 71%. Данный факт убедительно доказывает необходимость проведения тестирования в режиме максимальной скважности (минимального напряжения).

Таблица 4

Второй этап (оценка L_d на частоте 450 Гц, ЗПТ = 312 В) [1]:

Параметр	Оцененное значение	Погрешность
L_d	0,4145 мГн	$\approx 3,6\%$

Многократное повторение опытов показало стабильную сходимость результатов в интервале 0,41–0,42 мГн [1], что свидетельствует о высокой воспроизводимости метода.

5. Практические аспекты применения для диагностики

5.1. Формирование системы диагностических признаков

Таблица 5

Траектории изменения оценок параметров во времени могут служить надежными индикаторами развивающихся неисправностей [2, 11]:

Наблюдаемая динамика	Вероятный тип дефекта
Монотонный рост R_s	Перегрев обмоток, ослабление контактных соединений
Снижение L_d или L_q	Насыщение участка магнитопровода, витковое замыкание
Деградация Ψ_m	Частичное размагничивание магнитов [11]
Межосевая асимметрия индуктивностей	Несимметрия обмоток, нарушение изоляции



5.2. Стратегия принятия решений

Построение эффективной системы контроля предполагает выполнение следующей последовательности действий [2, 8]:

1. Инициализация базы данных – фиксация эталонных параметров исправного двигателя.
2. Циклическая идентификация – периодическое обновление оценок параметров.
3. Вычисление отклонений – сравнение текущего вектора параметров с эталонным.
4. Классификация состояния:
 - о в пределах допуска – «Работоспособное состояние»;
 - о выход за порог – фиксация неисправности с указанием вероятной причины [2];
 - о скачкообразное изменение – выдача аварийного сигнала.

Представленный метод органично встраивается в структуру тестового диагностирования, выполняемого штатными средствами электропривода без дополнительного измерительного оборудования [1, 2].

6. Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что сочетание частотного подхода с аппаратом функций чувствительности создает эффективный инструментарий для идентификации параметров СДПМ. К числу основных достижений следует отнести:

1. Доказанную возможность частотной селекции параметров, позволяющую независимо оценивать R_s и L_d благодаря различному характеру их влияния на ЛАЧХ объекта [1].
2. Обоснование выбора высокочастотного тестового сигнала как средства подавления искажений от «мертвого» времени инвертора и гистерезисных явлений в стали [1].
3. Подтвержденную экспериментально точность: для индуктивности – не хуже 5%, для активного сопротивления – не хуже 8% [1].
4. Разработанный RLS-алгоритм, адаптированный для работы на микроконтроллерных платформах в масштабе реального времени [9].
5. Практическую пригодность метода для создания систем тестовой диагностики, функционирующих без остановки технологического процесса [1, 2].

В качестве направлений дальнейших исследований предполагается:

- синтез расширенного алгоритма для одновременной оценки всех четырех ключевых параметров (R_s, L_d, L_q, Ψ_m);
- создание и валидация полного набора диагностических признаков для раннего обнаружения электрических дефектов;
- проведение натурных экспериментов на промышленном стенде с СДПМ и серийным преобразователем частоты;
- интеграция алгоритма в контур векторного управления для построения адаптивной системы с компенсацией параметрического дрейфа.

Список литературы:

1. Авдеев А.С., Осипов О.И. Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – №3 (52). – С. 38–46.
2. Глазырин А.С. и др. Критический экспертный анализ методов идентификации и наблюдателей переменных состояния синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 240–256.
3. Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38–42.



4. Лымарь А.Б., Омельченко Е.Я., Бочкарев А.А. Расчет параметров схемы замещения короткозамкнутого асинхронного двигателя на испытательном стенде с использованием нейронной сети // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – №3 (68). – С. 29–34.
5. Малёв Н.А. Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2020. – 216 с.
6. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
7. 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.
8. Малёв Н.А. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 56–68.
9. Koubaa Y. Recursive identification of induction motor parameters // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2004. – Vol. 12. – P. 363–381.
10. Моделирование синхронного двигателя с постоянными магнитами в MATLAB/Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/70859/> (дата обращения: 03.09.2026).
11. Метод токовой диагностики синхронного двигателя с постоянными магнитами с применением вейвлет-преобразований / Автореферат диссертации. – Магнитогорск, 2020.

