

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В работе предлагается метод оценки активного сопротивления и индуктивности синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) средствами электропривода, позволяющий уменьшить влияние нелинейностей магнитной цепи и нелинейности типа «мертвое» время. Предлагаемый метод основан на функции чувствительности передаточных функций к изменению параметров, частотном анализе и оптимизационном алгоритме, что позволяет анализировать и выбирать такие частоты и сигналы, при которых влияние тех или иных нелинейностей оказывается наименьшим. Предлагаемый алгоритм показал хорошие результаты моделирования на уточненных моделях с учетом влияния «мертвого» времени и нелинейности магнитной цепи. Экспериментальные данные подтвердили эффективность предлагаемого метода. В ходе эксперимента также было отмечено влияние нелинейности, связанное с эффектом вытеснения магнитного поля. При эксперименте в качестве эталонных значений параметров были использованы параметры, измеренные специализированными приборами (LC -метром и миллиомметром). Расхождения между оцененными и измеренными параметрами не превысили 5 %, что показывает хорошую точность оценки. Данный метод может быть использован в целях настройки системы управления, а также при построении системы тестовой диагностики технического состояния СДПМ

Ключевые слова: идентификация параметров, СДПМ, синхронный двигатель с постоянными магнитами, частотный метод, частотный анализ, функция чувствительности, оптимизационный метод, нелинейности, насыщение магнитной цепи, «мертвое» время.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроники и микропроцессорных систем способствует широкому распространению синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) ввиду их более высоких энергетических показателей. В связи с этим растут требования к качеству проектирования систем управления и уровню надежности электропривода, особенно в ответственных механизмах, относящихся к энергопотребителям первой и особой группы.

Одним из способов повышения качества регулирования в современных векторных системах управления и повышения надежности электропривода является создание системы идентификации параметров. Достаточно точное знание параметров СДПМ позволяет выполнить более качественную настройку контуров управления [1], что далеко не всегда можно сделать на основе паспортных данных. Задача идентификации параметров СДПМ к тому же тесно связана с задачей диагностирования его технического состояния [2], позволяющей определить наличие или отсутствие дефекта в двигателе. Отсюда понятна актуальность предварительной идентификации параметров СДПМ на стадиях еще разработок и проектирования высококачественного электропривода и, особенно, при непосредственной их настройке в пусковых режимах привода.

Требования, предъявляемые к системе идентификации, становятся особенно высокими при настройке и диагностике СДПМ средней и большой мощностей, где наибольшее влияние на оценку параметров, в частности на оценку активного сопротивления и индуктивности обмоток статора, оказывают «мертвое» время и

насыщение магнитной цепи двигателя.

В большинстве работ идентификация параметров СДПМ выполняется с использованием линеаризованной модели двигателя, не учитывающей эффектов насыщения [3–14]. Данные подходы зачастую основываются на адаптивных или оптимизационных методах [3–9, 14], которые относительно сложны в реализации, требовательны к вычислительным ресурсам и не всегда способны работать без предварительно известных параметров двигателя, например активного сопротивления или индуктивности обмоток его статора [3–5]. В то же время подходы, основанные на частотном анализе [12, 13] или на анализе переходных процессов переменных, на выходе отдельных элементов структурных схем электропривода [10, 11, 15] представляют особый интерес из-за их относительной простоты реализации, меньших требований к вычислительным ресурсам, а также возможности учета нелинейностей магнитной цепи.

Учет влияния «мертвого» времени при идентификации параметров рассматривается в работах [10, 14, 15]. Так, в [14] этот учет осуществляется добавлением или вычитанием задержки времени в зависимости от направления протекания тока. Подобный путь может давать высокую погрешность при малых значениях токов, поскольку не учитывает величину «мертвого» времени относительно скажности задания на выходное напряжение инвертора, зависящую от алгоритма ШИМ [16]. Данная проблема частично решена в [10, 15], где величина «мертвого» времени определяется экспериментально путем плавного увеличения задания на выходное напряжение инвертора и регистрации величины скажности в момент достижения тока установленного значения. Однако и здесь

имеется погрешность, связанная с задержкой измерения между появлением выходного напряжения инвертора и моментом достижения тока установленного значения.

Учет нелинейностей магнитной цепи выполнялся в работе [15]. Однако при использовании методов, основанных на анализе переходных процессов переменных отдельных элементов системы управления приводом, часто требуется дополнительная фильтрация анализируемого сигнала. К тому же методы анализа переходных процессов во временной области могут быть недостаточно чувствительны для более точной оценки требуемых параметров.

Ниже предлагается метод идентификации параметров электрической части СДПМ с учетом влияния нелинейностей типа «мертвого» времени и нелинейности магнитной цепи, базирующийся на методах частотного анализа и оптимизационного последовательного приближения, обеспечивающих достаточно высокую точность для построения высококачественной векторной системы управления и создания системы тестовой диагностики.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СДПМ

Предлагаемый метод основан на функции чувствительности передаточных функций к изменению параметров [17], частотном анализе [12] и оптимизационном алгоритме, что позволяет анализировать и выбирать такие частоты и сигналы, при которых влияние тех или иных нелинейностей оказывается наименьшим. Для его пояснения достаточно рассмотреть чувствительность частотных характеристик системы управления приводом к изменению анализируемых параметров, а также переходный процесс тока при подаче ступенчатого сигнала задания на выходное напряжение инвертора, после чего на их основе поэтапно выполнить саму процедуру идентификации. Ниже в качестве примера рассматривается идентификация активного сопротивления обмоток статора СДПМ и их индуктивности по осям d, q .

Функции чувствительности к изменению параметров СДПМ

Нелинейности типа «мертвого» времени или насыщения магнитной цепи могут вносить серьезные погрешности в оценку параметров. Особенно, если речь идет о мощных электродвигателях, где активное сопротивление исчисляется единицами МОм и погрешность в его оценке может быть недопустимо высокой. Поэтому при использовании метода частотного анализа при идентификации параметров двигателей особенно важно оценить области частотных характеристик, где влияние тех или иных параметров проявляется наиболее сильно, т.е. воспользоваться функциями их чувствительности [17].

В общем виде относительная чувствительность передаточной функции $W_{i,j}(s)$ системы управления между входной i и выходной j ее координатами к изменению любого параметра b_k , определяющего состояние k -го элемента системы, определяется как [17]

$$S_{b_k}^{W_{i,j}}(s) = \frac{\partial W_{i,j}(s)}{\partial b_k} \cdot \frac{b_k}{W_{i,j}(s)}. \quad (1)$$

Применяя данное определение к передаточной функции обмотки статора СДПМ по оси d (рис. 1), получим:

$$\begin{aligned} S_{R_c}^{W_{U,I}}(s) &= \frac{\partial W_{U,I}(s)}{\partial R_c} \cdot \frac{R_c}{W_{U,I}(s)} = -\frac{R_c}{L_d s + R_c}; \\ S_{L_d}^{W_{U,I}}(s) &= \frac{\partial W_{U,I}(s)}{\partial L_d} \cdot \frac{L_d}{W_{U,I}(s)} = -\frac{L_d s}{L_d s + R_c}, \end{aligned} \quad (2)$$

где s – оператор Лапласа; R_c, L_d – активное сопротивление и индуктивность статора по оси d .

В частотной же области функции чувствительности могут быть представлены их логарифмическими амплитудно-частотными характеристиками (ЛАЧХ) подобно рис. 2 [14].

Из представленных функций чувствительностей видно, что активное сопротивление оказывает наибольшее влияние на ЛАЧХ в области низких частот (до частоты среза ω_{cp}), а индуктивность, напротив, в области высоких частот (после ω_{cp}).

Интересно в частотной области и влияние «мертвого» времени на величину вектора выходного напряжения инвертора. Так, на рис. 3 представлена частотная характеристика, демонстрирующая влияние «мертвого» времени на величину вектора выходного напряжения инвертора [14].

Из представленных характеристик видно, что «мертвое» время оказывает наибольшее влияние в области низких частот ЛАЧХ. В области же высоких частот, даже при относительно малых величинах задания на выходное напряжение инвертора, «мертвое» время оказывает значительно меньшее влияние, приближаясь при дальнейшем увеличении частот к идеализированной характеристике. Фазочастотная характеристика ФЧХ функции чувствительности при этом имеет обратную зависимость.

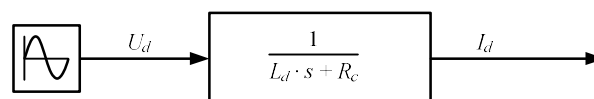


Рис. 1. Структурная схема канала формирования тока СДПМ по оси d ; L_d, R_c – индуктивность обмоток статора по оси d и ее активное сопротивление; U_d, I_d – напряжение и ток по оси d

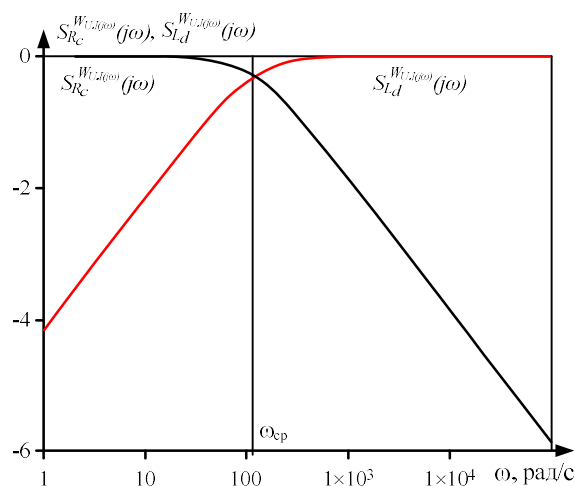


Рис. 2. Функция чувствительности к изменению активного сопротивления и индуктивности в частотной области

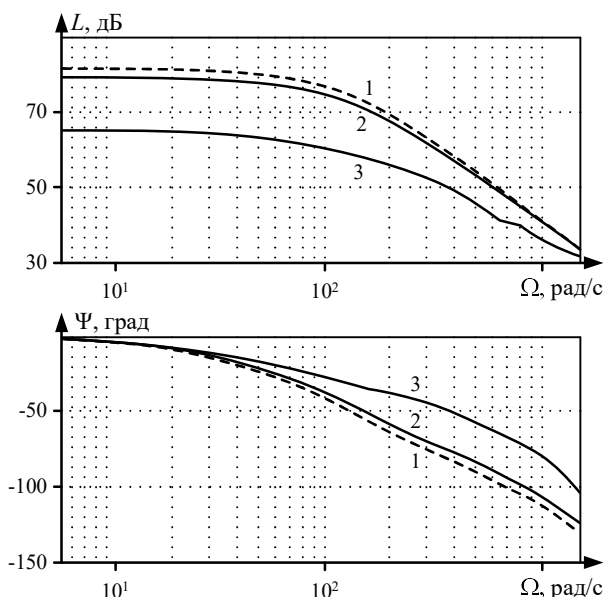


Рис. 3. Влияние «мертвого» времени на частотные характеристики: 1 – при отсутствии «мертвого» времени; 2 – при наличии «мертвого» времени и амплитуде задающего сигнала 0,5; 3 – при наличии «мертвого» времени и амплитуде задающего сигнала 0,1

Учитывая подобные зависимости чувствительностей параметров можно отметить, что при использовании метода частотного анализа наиболее точную оценку индуктивности можно получить в области высоких частот, где практически отсутствует влияние как «мертвого» времени, так и активного сопротивления. Основной проблемой при этом будет необходимость учета влияния насыщения магнитной цепи.

Оценку активного сопротивления без влияния индуктивности целесообразно выполнять в области низких частот, а точнее при нулевой частоте. Однако при этом «мертвое» время может внести наибольшую погрешность, что может быть критичным в случае относительно небольших величин активного сопротивления обмоток.

На основании изложенного можно рассмотреть основные этапы и методы идентификации параметров СДПМ.

Первый этап. Оценка постоянной времени обмотки СДПМ.

Обмотка статора фазы А представляет собой RL -цепь, определяемую соотношением

$$U_a = I_a R_a + L_a \frac{\partial I_a}{\partial t}, \quad (3)$$

где U_a , I_a – напряжение и ток фазы А; R_a , L_a – активное сопротивление и индуктивность фазы А.

Время переходного процесса в этом случае определяется электромагнитной постоянной времени $T_a = L_a / R_a$. Величина же установившегося значения тока при подаче ступенчатого сигнала напряжения будет зависеть исключительно от соотношения напряжения и активного сопротивления, постоянная времени при этом никакой роли играть не будет. Следовательно, погрешности, вносимые «мертвым» временем в величину выходного напряжения, на значение постоянной

времени никакого влияния оказывать не будут.

Следует отметить, что постоянная времени в нелинейной магнитной системе в среднем, т.е. при рассмотрении всего переходного процесса в целом, будет определяться статической индуктивностью, а не дифференциальной.

Оптимизационные алгоритмы в относительно простой модели способны с высокой точностью аппроксимировать кривую переходного процесса, тем самым с высокой точностью определяя значение постоянной времени фазы СДПМ. При этом отдельные параметры, т.е. активное сопротивление и индуктивность, могут совершенно не соответствовать своим действительным значениям.

На рис. 4 представлены результаты математического моделирования переходных процессов токов при скачке задания на напряжение по оси d «реального» двигателя и его математической модели (см. рис. 1) с введением в идентифицируемую модель эффекта «мертвого» времени. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

По результатам моделирования видно, что постоянная времени была определена точно, хотя составные параметры идентифицировались с неприемлемо высокой погрешностью. Из этого можно заключить, что применение оптимизационных алгоритмов без точного учета влияния нелинейностей способно внести серьезные искажения в оценку взаимозависимых параметров.

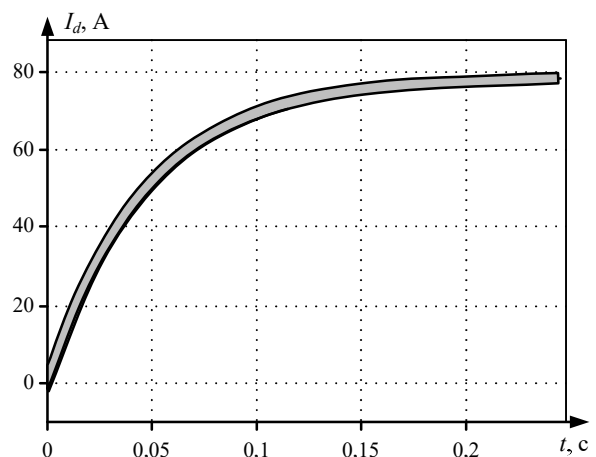


Рис. 4. Результаты математического моделирования токов «реального» СДПМ (светло серый) и его модели (черный)

Таблица 1

Результаты идентификации параметров активного сопротивления, индуктивности и постоянной времени по оси d

Параметр	Значение
Частота ШИМ, кГц	10
Напряжение в ЗПТ, В	500
Величина «мертвого» времени, мкс	2
Задание на напряжение, В	10,1
Оцененная индуктивность, мкГн	857,01
Фактическая индуктивность, мкГн	39,5
Оцененное активное сопротивление, мОм	18,44
Фактическое активное сопротивление, мОм	0,85
Фактическая постоянная времени, с	0,04647
Оцененная постоянная времени	0,04653

Для идентификации индуктивности как составной части постоянной времени в качестве оптимизационного алгоритма целесообразно использовать алгоритм последовательного приближения с малой вычислительной мощностью и временными затратами. Активное сопротивление же вычисляется непосредственно как

$$R_c = \frac{U_d}{I_d}. \quad (4)$$

Таким образом, по известной индуктивности и активному сопротивлению рассчитывается электромагнитная постоянная времени.

Второй этап. Оценка индуктивности СДПМ.

Имея точное значение электромагнитной постоянной времени, представляется возможным выбрать частоту для идентификации индуктивности, опираясь на предыдущие результаты (см. **рис. 2**). Далее для СДПМ будет использоваться частота до 500 Гц (3140 рад/с) при частоте ШИМ в 10 кГц.

Определение индуктивности на основе метода частотного анализа [12] возможно по соотношению

$$L_d = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{dm}}{I_{dm}}\right)^2 - R_c^2}}{\omega}, \quad (5)$$

где U_{dm} , I_{dm} – амплитудные значения напряжения и тока по оси d ; ω – угловая частота тестового сигнала.

В выражении (5) присутствует неизвестная переменная – активное сопротивление статора. Однако при высокой частоте им можно пренебречь без серьезной погрешности. Тогда в области высоких частот выражение (5) можно упростить следующим образом:

$$L_d \approx \frac{U_{dm}}{\omega I_{dm}}. \quad (6)$$

Для проверки (6) воспользуемся математической моделью (**рис. 5, 6**), приняв активное сопротивление $R_s = 0,00085$ Ом (см. **табл. 1**). Результаты оценки индуктивности при пренебрежении величиной активного сопротивления показаны в **табл. 2** и при трех разных частотах тестового сигнала.

По результатам моделирования при повышении частоты тестового сигнала погрешность в оценке индуктивности уменьшается.

Для учета влияния насыщения магнитной цепи СДПМ возможно применение метода гармонической линеаризации [18], отметив, что он дает статическое значение индуктивности, а не дифференциальное. Статическое значение позволяет относительно простыми средствами получить приемлемую точность оценки индуктивности для настройки наблюдателя, имеющего достаточно большой запас устойчивости или, как будет показано ниже, с его помощью можно получить точное значение активного сопротивления.

Гармоническая линеаризация позволяет исходную нелинейную систему, в выходном сигнале которой присутствуют высшие гармоники, заменить эквивалентной линейной схемой с синусоидальной выходной реакцией, отбросив при этом все высшие гармоники, оставив только основную.

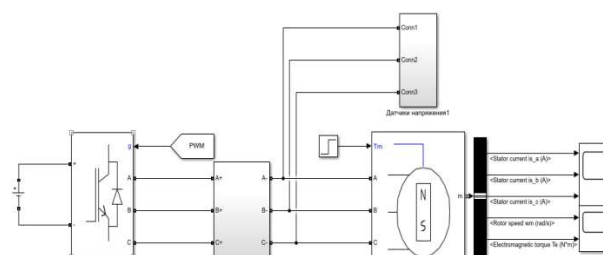


Рис. 5. Математическая модель силовой части

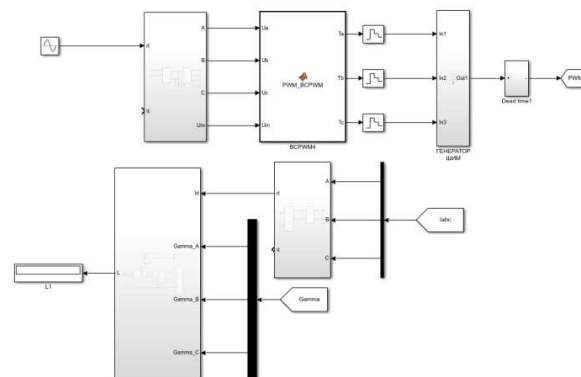


Рис. 6. Математическая модель системы идентификации индуктивности

Таблица 2

Результаты оценки индуктивности без учета активного сопротивления

Параметр	50 Гц	250 Гц	500 Гц
Частота ШИМ, кГц	10	10	10
Напряжение в ЗПТ, В	500	500	500
Величина «мертвого» времени, мкс	2	2	2
Амплитуда задания на напряжение, о.е.	0,2	0,2	0,2
Оцененная индуктивность, мкГн	42,11	41,05	39,53
Фактическая индуктивность, мкГн	39,5	39,5	39,5
Погрешность, %	6,6	3,8	0,5

На **рис. 7** представлена структурная схема для выделения амплитуды основной гармоники частотного тестового сигнала.

Здесь частотный сигнал пропускается через фильтр низких частот с компенсацией амплитуды основного сигнала, отфильтровывая высшие гармоники. Затем отфильтрованный сигнал проходит через фазосдвигающее устройство, которое дублирует входной сигнал, сдвигая его на 90 град. В итоге, два синусоидальных отфильтрованных сигнала, сдвинутых друг относительно друга на 90 град попадают в блок расчета амплитуды.

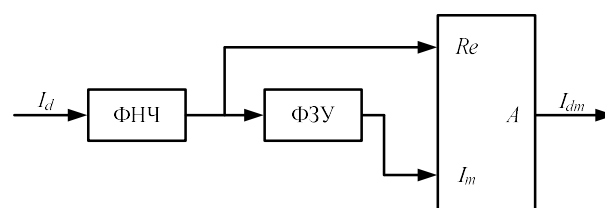


Рис. 7. Структурная схема расчета амплитуды сигнала

Преимущество подобного метода для выделения амплитуды основной гармоники в отличие от алгоритмов БПФ, ДПФ и др. состоит в простоте реализации, он не требует дополнительных ресурсов памяти для накопления данных, а также обладает высоким быстродействием, которое зависит лишь от постоянной времени фильтра.

На рис. 8 показаны результаты моделирования токов нелинейной и линеаризованной передаточной функции обмотки статора по оси d .

На рис. 9 и 10 представлены спектры токов нелинейной и линеаризованной передаточной функции обмотки статора по оси d .

На рис. 11 показаны результаты моделирования токов нелинейной и линеаризованной передаточной функции обмотки статора по оси d при подаче ступенчатого сигнала напряжения.

По результатам моделирования видно, что при оценке индуктивности использование основной гармоники позволяет выполнить гармоническую линеаризацию нелинейного элемента. Кроме того, представленный метод относительно прост в реализации и времени оценки индуктивности, что делает его более привлекательным на практике.

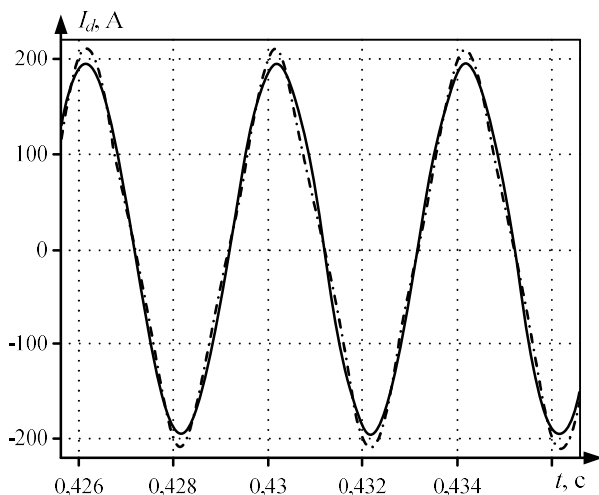


Рис. 8. Результаты моделирования токов нелинейной (штрихпунктирная линия) и линеаризованной (сплошная линия) передаточной функции обмотки статора по оси d

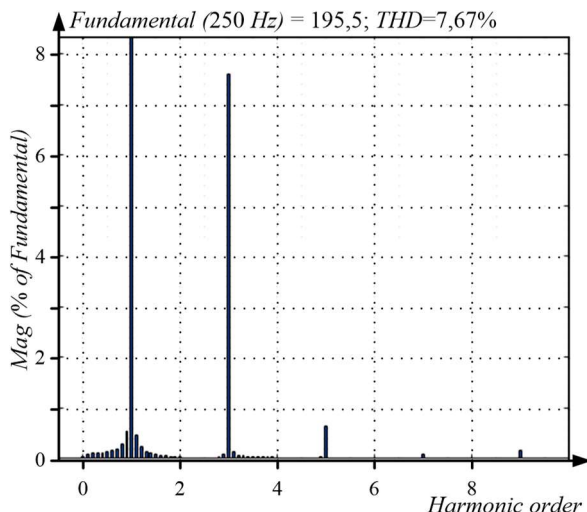


Рис. 9. Спектр тока при нелинейной нагрузке по оси d

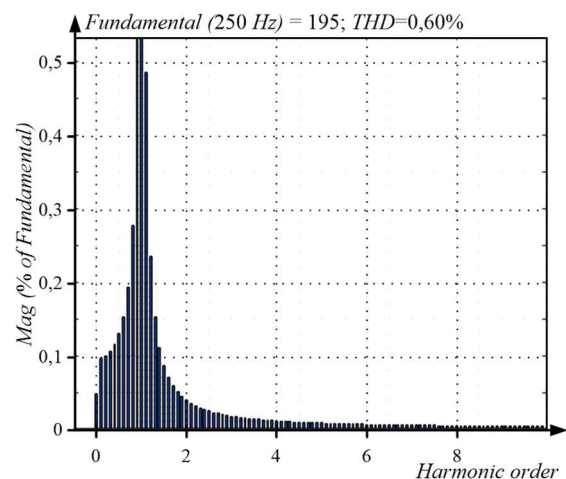


Рис. 10. Спектр тока при линеаризованной индуктивности по оси d

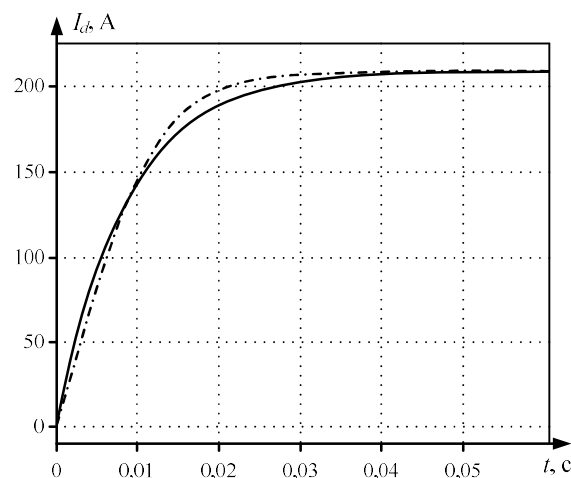


Рис. 11. Результаты моделирования токов нелинейной (штрихпунктирная линия) и линеаризованной (сплошная линия) передаточной функции обмотки статора по оси d при подаче ступенчатого сигнала напряжения

Третий этап. Оценка активного сопротивления СДПМ.

При наличии статического значения индуктивности и электромагнитной постоянной времени обмотки фазы активное его сопротивление определяется как

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

где T_d – электромагнитная постоянная времени обмотки статора по оси d , определяемая на первом этапе идентификации.

Итог идентификации параметров с применением рассмотренной последовательности и введенного в модель «мертвого» времени представлен в табл. 3.

Таблица 3

Результаты идентификации параметров с применением предложенного алгоритма

Параметр	Значение
Оцененная индуктивность, мкГн	39,53
Фактическая индуктивность, мкГн	39,5
Погрешность в оценке индуктивности, %	0,5
Оцененное сопротивление, мОм	0,8507
Фактическое сопротивление, мОм	0,85
Погрешность в оценке сопротивления, %	0,07

Идентификация индуктивности по оси q фактически ничем не отличается от оси d , ввиду высокой частоты тестового сигнала и относительно большой механической постоянной времени двигателя [12].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проектные технические параметры ПЧ и СДПМ представлены в табл. 4.

Фактические параметры СДПМ (активное сопротивление и индуктивность) были оценены специализированными приборами (LC -метром и миллиомметром).

Осциллограммы переходных процессов токов СДПМ и его математической модели с оцененными параметрами согласно первому этапу представлены на рис. 12 и 13.

В табл. 5 и 6 представлены результаты оценки параметров на первом этапе идентификации при разных уровнях напряжения ЗПТ и, соответственно, при разных уровнях скажности задания на выходное напряжение инвертора. Чем ниже напряжение ЗПТ, тем выше скажность, а следовательно, меньше влияние «мертвого» времени. Из представленных результатов видно, что оценка постоянной времени практически не зависит от величины «мертвого» времени. Так, при разных величинах напряжения в ЗПТ (разных скажностях задания на выходное напряжение) разница в оценке постоянной времени не превышает 5%.

Таблица 4
Проектные технические параметры ПЧ и СДПМ

Параметр	Значение
Напряжение ЗПТ, В	311
«Мертвое» время, мкс	1
Номинальная мощность, кВт	5,5
Номинальное напряжение, В	110
Номинальный ток, А	14,1
Число пар полюсов	3
Активное сопротивление статора, мОм	165
Индуктивность статора по оси q , мГн	0,46
Индуктивность статора по оси d , мГн	0,43
Потокоцепление ротора, Вб	0,1
Момент инерции ротора, Н·м ²	0,036
Номинальная скорость, рад/с	314

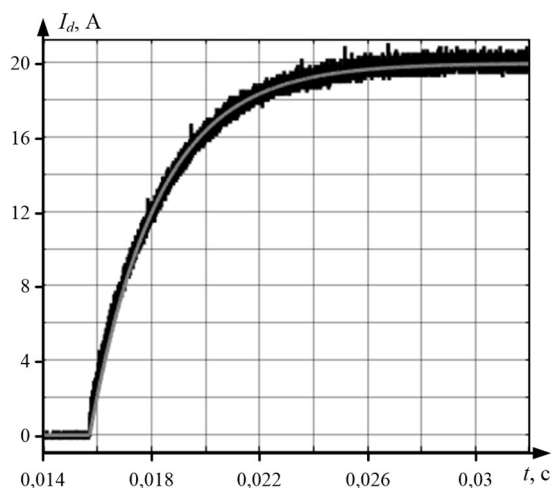


Рис. 12. Переходный процесс токов СДПМ (черный) и модели (серый) по оси d при напряжении ЗПТ 72 В

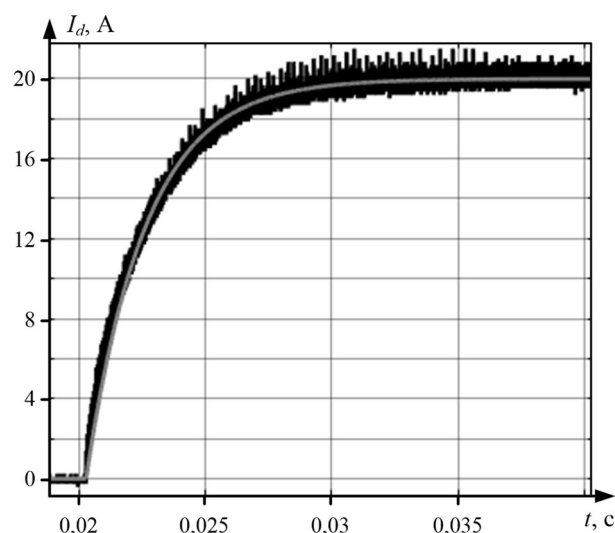


Рис. 13. Переходный процесс токов СДПМ (черный) и модели (серый) по оси d при напряжении ЗПТ 312 В

Таблица 5
Оценка параметров на первом этапе идентификации при напряжении ЗПТ 72 В

Параметр	Значение
Оцененная индуктивность, мГн	0,4488
Фактическая индуктивность, мГн	0,43
Погрешность в оценке индуктивности, %	4,4
Оцененное сопротивление, мОм	178
Фактическое сопротивление, мОм	165
Погрешность в оценке сопротивления, %	7,9
Постоянная времени, мс	2,519

Таблица 6
Оценка параметров на первом этапе идентификации при напряжении ЗПТ 312 В

Параметр	Значение
Оцененная индуктивность, мГн	0,677
Фактическая индуктивность, мГн	0,43
Погрешность в оценке индуктивности, %	36,48
Оцененное сопротивление, мОм	282
Фактическое сопротивление, мОм	165
Погрешность в оценке сопротивления, %	71
Постоянная времени, мс	2,401

При этом остальные параметры постоянной времени (активное сопротивление и индуктивность) значительно отличаются, и чем выше напряжение в ЗПТ и меньше скажность задания, тем выше погрешность. Далее при идентификации индуктивности в ЗПТ использовалось напряжение 312 В. Также данную разницу можно учесть на этапе проектирования и испытаний.

В табл. 7 представлены результаты оценки индуктивности без учета активного сопротивления – второй этап идентификации.

В табл. 8 представлены результаты третьего заключительного этапа идентификации параметров СДПМ.

При многократном повторении с характеристиками сигнала, представленными в табл. 7, оценка индуктивности находилась в границах 0,41 – 0,42 мГн.

Таблица 7
Оценка параметров на втором этапе идентификации

Параметр	Значение
Напряжение в ЗПТ, В	312
Частота тестового сигнала, Гц	450
Амплитуда тока, А	20
Оцененная индуктивность, мГн	0,4145
Фактическая индуктивность, мГн	0,43
Погрешность в оценке индуктивности, %	3,6

Таблица 8
Оценка параметров на первом этапе идентификации при напряжении ЗПТ 312 В

Параметр	Значение
Оцененная индуктивность, мГн	0,4145
Фактическая индуктивность, мГн	0,43
Погрешность в оценке индуктивности, %	3,6
Оцененное сопротивление, мОм	172,6
Фактическое сопротивление, мОм	165
Погрешность в оценке сопротивления, %	4,4

Стоит отметить, что измерения специализированными приборами проводились путем отключения контактов от силовых модулей инвертора и подключения их посредством зажимов («крокодилов») к измерительным приборам. В этом случае на измерения в той или иной мере могли повлиять окислы на контактах, площадь контакта и т.д. С учетом этого полученные результаты демонстрируют хорошую точность идентификации параметров по отношению к специализированным приборам. Однако для более точного учета дополнительных возможных источников погрешностей следует отметить частоту дискретизации, при которой снимается переходный процесс и эффект вытеснения магнитного потока.

При расчете постоянной времени на частоте дискретизации переходного процесса в 10 кГц и 2 МГц разница в оценке не выходила за границы в $\pm 4,5$ % от среднего значения. Для более точного результата и нивелирования данной погрешности имеет смысл произвести усреднение по нескольким замерам. Кроме того, для исключения статической погрешности измерения тока на периоде ШИМ целесообразно также производить усреднение по восьми выборкам АЦП за период ШИМ [1].

Эффект вытеснения магнитного потока для испытуемого СДПМ вносит наибольшее влияние. Разница в оценке индуктивности с помощью специализированного LC-метра на частотах в 100 Гц и 1 кГц составляет 14 % (для СДПМ с номинальной мощностью 150 кВт данный показатель составляет 9 %). Заметим, что при подаче ступенчатого сигнала напряжения, постоянстве активного сопротивления и линейности магнитной системы в функции тока переходный процесс тока отражает изменения индуктивности в функции частоты. Данный эффект можно заметить на рис. 12 и 13 (в начале переходного процесса темп нарастания тока выше, следовательно, ниже индуктивность). Таким образом, переходный процесс при обозначенных условиях отражает значение индуктивности от частоты в среднем, т.е. усредненное значение во всем частотном диапазоне.

Для уменьшения влияния эффекта вытеснения тока необходимо произвести оценку индуктивности в широком диапазоне частот с последующим усреднением. В области низких частот (100 Гц) для уменьшения погрешности, связанной с учетом активного сопротивления, возможно использование значения активного сопротивления, вычисленного по усредненному значению индуктивности в области высоких частот, после чего по уточненным значениям индуктивности повторить оценку активного сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был предложен метод идентификации активного сопротивления и индуктивности СДПМ, основанный на использовании функций чувствительностей передаточных функций к изменению параметров активного сопротивления и индуктивности, частотном анализе и оптимизационных алгоритмах. Данный метод позволяет учитывать и снижать влияние нелинейности магнитной цепи СДПМ, а также нелинейности типа «мертвое» время, тем самым повышая точность оценки параметров СДПМ.

Предложенный метод показал приемлемые результаты как при математическом моделировании, так и при экспериментальном исследовании. Он может быть применен как для целей автоматической настройки системы управления электропривода на базе СДПМ, так и для построения тестовой системы диагностирования технического состояния электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Алексеев А.А., Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
3. Бобцов А.А., Пыркин А.А., Ортега Р. Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. №1(15). С. 40-45. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45
4. Базылев Д.Н., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Гибридный алгоритм оценки магнитного потока для синхронного двигателя // Навигация и управление движением: материалы XVII конференции молодых ученых / Конференция «Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор"». СПб., 2015. С. 175-180.
5. Yang Z., Zhonggang Y. On-line Identification Methods of Parameters for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Cascade MRAS // 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. IEEE, 2015. Pp. 345-350. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167808
6. Marcic T., Štumberger B., Štumberger G. Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61. No. 11. Pp. 5921-5929. doi: 10.1109/TIE.2014.2308160
7. Avdeev A., Osipov O. PMSM Identification Using Genetic Algorithm // 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). 2019. 4 p. doi: 10.1109/IWED.2019.8664250
8. Анисимов А.А., Горячев М.Н. Идентификация электро-механических систем с использованием искусственной нейронной сети // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. №3. С. 55-58.

9. Гребенникова И.В. Методы оптимизации: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2017. 148 с.
10. Анучин А.С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дис. ... докт. техн. наук. 05.09.03 / Анучин Алексей Сергеевич. Москва, 2018.
11. Вдовин В.В. Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дис. ... канд. техн. наук. 05.09.03 / Вдовин Владимир Владимирович. Новосибирск, 2014.
12. Авдеев А.С., Осипов О.И. Идентификация параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе их частотного анализа // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. № 1 (174). С. 8-14.
13. Extended algorithm of servodrive mechanical parameters identification via frequency response analysis / E. Samygina, M. Tiapkin, A. Balkovoi, L. Rassudov // 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). IEEE, 2020. 6 p. doi: 10.1109/IWED48848.2020.9069569
14. Параметрическая идентификация модели сервопривода с нелинейностями типа «мертвое время» / Т. Орловаска-Ковальска, С.Ю. Ловлин, М.Х. Цветкова, А.А. Абдулин, А.Г. Маматов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. № 6(62). С. 576–584.
15. Шпак Д.М. Разработка и исследование системы управления высокоскоростных шпинделей станков на базе асинхронных и синхронных электродвигателей: автореф. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 20 с.
16. Чув П.В. Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: дис. ... канд. техн. наук. 05.09.03 / Чув Павел Вячеславович. Москва, 2002. 257 с.
17. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. М.: Энергоавтомиздат, 1991. 160 с.
18. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 768 с.

Поступила в редакцию 29 июня 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRICAL PARAMETERS IDENTIFICATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Aleksandr S. Avdeev

Master of Engineering, Engineer, "VNIIEEM Corporation" JC, Moscow, Russia. E-mail: alex_ac94@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5525-8111>

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of Automated Electric Drive, Moscow Power Engineering Institute (MPEI) (National Research Institute), Moscow, Russia. E-mail: osipovoi2015@yandex.ru.

The paper proposes a method for assessing the active resistance and inductance of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) by means of an electric drive, which makes it possible to reduce the influence of magnetic circuit nonlinearities and "dead" time nonlinearities. The proposed method is based on the sensitivity function of transfer functions to changes in parameters, frequency analysis and an optimization algorithm, which makes it possible to analyze and select such frequencies and signals at which the effect of certain nonlinearities is the least. The proposed algorithm has shown good simulation results on refined models taking into account the influence of "dead" time and magnetic circuit nonlinearity. Experimental data have confirmed the effectiveness of the proposed method. In the experiment, the parameters measured by specialized devices (LC-meter and milliohmmeter) were used as reference parameter values. The discrepancy between the estimated and measured parameters did not exceed 5%, which shows a good estimation accuracy. This method can be used to configure the control system, as well as to build a system for test diagnostics of the technical condition of the PMSM.

Keywords: parameters identification, PMSM, permanent magnet synchronous motor, frequency analysis, frequency method, sensitivity function, optimization method, nonlinearities, saturation of the magnetic circuit, "dead" time.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI publishing house, 2015, 373 p. (In Russian)
2. Alekseev A.A., Korabiev Iu.A., Shestopalov M.Iu. *Identifikatsiya i diagnosika sistem* [Identification and diagnostics of systems]. Moscow, Publishing center "Academiya", 2009, 351 p. (In Russian)
3. Bobstov A.A., Pyrkin A.A., Ortega R. Adaptive observer of magnetic flux for permanent magnets synchronous motor. *Nauhno tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2015, no. 1 (15), pp. 40-45. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-40-45
4. Bazylev D. N., Pyrkin A. A., Bobstov A. A. Hybrid Algorithm of Magnetic Flux Assessment for Synchronous Motor. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem: materialy XVII konferentsii molodykh uchennykh* [Navigation and movement control: materials of XVII conference of young scientists]. Concern CSRI Elektropribor Publ., 2015, pp. 175-180. (In Russian)
5. Yang Z., Zhonggang Y. On-line Identification Methods of Parameters for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Cascade MRAS. 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015, pp. 345-350. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167808
6. Marcic T., Štumberger B., Štumberger G. Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 5921-5929. doi: 10.1109/TIE.2014.2308160
7. Avdeev A. Osipov O. PMSM Identification Using Genetic Algorithm. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/IWED.2019.8664250
8. Anisimov A.A., Goryachev M.N. Identification of electromechanical systems with using of artificial neural network. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo state power engineering university], 2008, no.3, pp. 55-58. (In Russian)

9. Grebennikova I. V. *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Yekaterinburg, UrFU, 2017, 148 p. (In Russian)
10. Anuchin A. S. *Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv*. Doct. Diss. [Development of digital systems for efficient control of sets of tracing electrical equipment of electric vehicles. Doct. Diss.]. Moscow, 2018, 445 p. (In Russian)
11. Vdovin V.V. *Adaptivnye algoritmy otsenivaniya koordinat bezdatchikovyykh elektroprivodov peremennogo toka s rasshirennym diapazonom regulirovaniya*. Kand.Diss. [Adaptive algorithms of assessment of coordinates of sensorless alternative current electric drives with extended control range. Ph.D.Diss.]. Novosibirsk, 2014, 244 p. (In Russian)
12. Avdeev A.S., Osipov O.I. Parameters identification of permanent magnet synchronous motor based on frequency analysis. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*. [Electromechanical matters. VNIIEM studies], 2020, no. 1(174), pp. 8-14. (In Russian)
13. Samygina E., Tiapkin M., Balkovoi A., Rassudov L. Extended algorithm of servodrive mechanical parameters identification via frequency response analysis. 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), 2020, 6 p. doi: 10.1109/IWED48848.2020.9069569
14. Orlovaska-Kovalska T., Lovlin S.Yu., Tsvetkova M.Kh., Abdulin A.A., Mamatov A.G. Parametric identification of a servo drive model with nonlinearities of the "dead time" type. *Izv. Vuzov. Priborostroenie*. [Journal of Instrument Engineering], 2019, vol. 62, no. 6, pp. 576–584. (In Russian)
15. Shpak D.M. *Razrabotka i issledovanie sistemy upravleniya vysokoskorostnykh shpindeley stankov na baze asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley*. Kand.Diss. [Development and research of a control system for high-speed spindles of machine tools based on asynchronous and synchronous electric motors. Abstract of Ph.D. Diss.]. Moscow, 2019. 20 p.
16. Chuev P.V. *Razrabotka sistem vektornogo upravleniya asinkhronnymi privodami na baze spetsializirovannykh signalnykh mikrokontrollerov*. Kand.Diss. [Development of vector control systems for asynchronous drives based on specialized signal microcontrollers. Ph.D.Diss.]. Moscow, 2002, 257 p.
17. Osipov O.I., Usygin Yu.S. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomatizirovannykh elektroprivodov*. [Technical diagnostics of automated electric drives]. Moscow, Energoavtom-publiishing house, 1991. 160 p. (In Russian)
18. Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Saint Petersburg, publishing house "Professiya", 2003, 768 p. (In Russian)

Авдеев А.С., Осипов О.И. Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 38-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-38-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46)

Avdeev A.S., Osipov O.I. Electrical Parameters Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 38-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-38-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46)