

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ ИХ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

А. С. Авдеев, О. И. Осипов

*Исследуется возможность применения частотного метода для идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами. Анализ известных методов идентификации параметров подобных двигателей показал целесообразность обращения к их частотным методам. На основе математической модели синхронных двигателей с постоянными магнитами рассматривается возможность применения частотного метода идентификации его параметров, представлен пример его практической реализации, подтверждающий эффективность метода.*

*Ключевые слова:* синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическая модель, идентификация параметров, частотный метод.

### Введение

Развитие электроники и микропроцессорных систем управления положило начало широкому распространению синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) ввиду их более высоких энергетических показателей. Одним из основных методов управления СДПМ является векторное управление. Векторное управление требует знания конкретных и достаточно точных значений параметров электродвигателя, особенно при проектировании бездатчиковых систем векторного управления и на стадии их ввода в эксплуатацию [1]. Следует отметить, что точность требуемых параметров всегда будет связана с технологическими требованиями со стороны объекта регулирования, и чем оно выше, тем качественнее будет выполнена настройка всего привода. Большинство из этих параметров не приводятся в справочниках, или справочные параметры не всегда соответствуют реально выбранным машинам. Отсутствие реальных параметров исключает качественную реализацию систем управления СДПМ. Отсюда понятна актуальность предварительной идентификации параметров СДПМ на стадиях их разработок и проектирования высококачественного электропривода.

### Анализ возможных методов идентификации параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами

Методы идентификации СДПМ можно разделить на две наиболее общие категории [2, 3]: методы, функционирующие в режиме реального времени, и методы постобработки измерений. Методы первой категории нашли большое применение в задачах компенсации возмущений в адаптивных системах [4, 5]. Методы второй категории предназначены для оценки параметров на основе накопленных экспериментальных данных, что увеличивает временные затраты на накопление и их дальнейшую обработку.

Методы первой группы возможны для идентификации параметров электромеханических преобразователей [2, 6] и, в частности, для СДПМ. Однако с их помощью достаточно сложно оценить некоторые параметры машины. Например, предлагаемые алгоритмы в работах [7, 8] применимы только к неявнополюсным машинам. Адаптивный наблюдатель активного сопротивления и магнитного потока, рассматриваемый в работе [9], требует предварительного знания индуктивностей по осям  $d - q$  и наличия сведений о скорости вала двигателя, что немедленно вызывает трудности при внедрении подобного наблюдателя в бездатчиковые системы управления. К тому же, в реальных системах почти всегда присутствуют шумы измерений, а сам двигатель подвержен внешним возмущениям. Существует несколько подходов к решению задачи идентификации в условиях таких возмущений: введение фильтров, включение возмущений в модель системы и идентификация расширенной модели или использование характеристик системы, инвариантных к конкретному виду возмущений [2, 5]. Однако для наилучшего выбора параметров фильтра требуется априорная информация о характере помех и возмущений, а также не всегда удается найти инвариантную к возмущениям модель.

Методы второй категории позволяют избежать недостатков, связанных с влиянием помех и возмущений, позволяя получить более точную предварительную оценку интересующих параметров двигателя. Например, в работах [10, 11, 12] идентификация параметров двигателя производится с помощью мощных средств оптимизации: генетических алгоритмов и нейронных сетей. При этом СДПМ рассматривается как «черный ящик» и главным критерием правильности оценки параметров становится минимизация функции между данными, полученными с реального объекта и математической моделью. Кроме генетических алго-

ритмов и нейронных сетей возможно применение других оптимизационных методов, таких как: метод градиентного спуска, метод наискорейшего спуска, метод Ньютона и др. [13]. Главным недостатком таких методов являются заметные временные затраты и большие вычислительные мощности, что делает их труднореализуемыми на микроконтроллерах преобразователей частоты, питающих электродвигатели.

Помимо оптимизационных методов для идентификации параметров СДПМ встречаются методы, основанные на анализе переходных процессов отдельных элементов структурных схем электропривода [14]. Однако при использовании подобных методов часто требуется дополнительная фильтрация анализируемого сигнала. К тому же, методы анализа переходных процессов, рассматриваемых во временной области, могут быть недостаточно чувствительны для точной оценки требуемых параметров.

Для сокращения времени предварительной идентификации параметров бездатчиковой системы векторного управления, уменьшения требуемых вычислительных мощностей при сохранении достаточно высокой точности идентификации параметров СДПМ может быть предложен метод, основанный на анализе его частотных характеристик.

Отметим, что под достаточно высокой точностью, понимается точность идентификации, обес-

печивающая корректную (устойчивую) работу адаптивного наблюдателя скорости [15, 16].

### Этапы идентификации параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами частотным методом

Для пояснения метода идентификации параметров СДПМ на основе его частотных характеристик можно воспользоваться математической моделью СДПМ во вращающейся системе координат  $d - q$  в форме структурной схемы на рис. 1 [14, 15, 16], где подсистемы электрической и механической части СДПМ выделены отдельно. Принято, что СДПМ получает питание от преобразователя частоты (ПЧ) на основе автономного инвертора напряжения [1].

Из рис. 1 видно, что при заторможенном валу СДПМ, следовательно, при отсутствии обратной связи по электродвижущей силе (ЭДС) двигателя и за счет соответствующей ориентации системы векторных координат  $d$  и  $q$  математической модели СДПМ [1] возможно отдельно определить передаточные функции между напряжением питания, токами и потокосцеплениями обмоток статора и на их основе поэтапно определить основные параметры двигателя. Для их идентификации должны быть доступны такие информационные сигналы, как напряжение в звене постоянного тока питания автономного инвертора напряжения ПЧ, скважности задания напряжений по осям  $d - q$  ( $U_d, U_q$ ) и токи статора по осям  $d - q$  ( $I_d, I_q$ ).

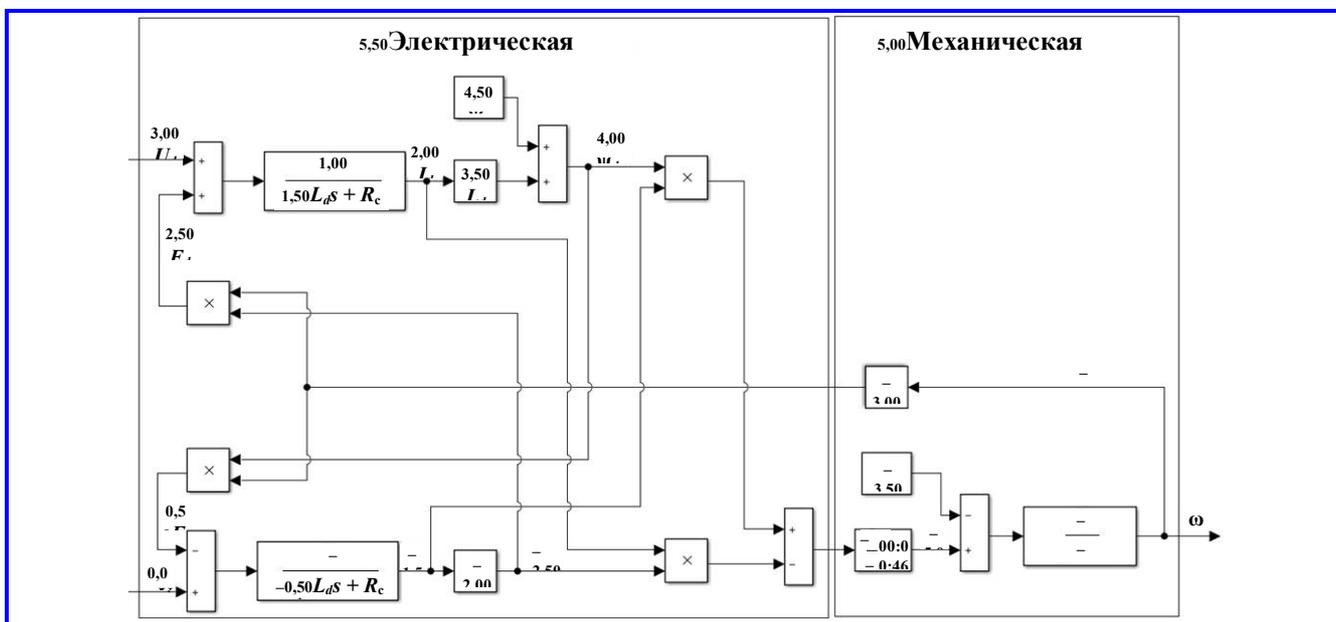


Рис. 1. Структурная схема синхронных двигателей с постоянными магнитами в системе координат  $d - q$ :  $U_d, U_q$  – напряжения, прикладываемые к статору по осям  $d - q$ ;  $I_d, I_q$  – токи статора по осям  $d - q$ ;  $E_d, E_q$  – противо-ЭДС двигателя по осям  $d - q$ ;  $\psi_f$  – потокосцепление ротора;  $\psi_d, \psi_q$  – составляющие потокосцепления статора по осям  $d - q$ ;  $M$  – механический момент двигателя;  $M_c$  – статический момент сил сопротивления на валу двигателя;  $L_d, L_q, R_c$  – соответственно индуктивности обмоток статора по осям  $d - q$  и их активное сопротивление;  $p_n$  – число пар полюсов двигателя;  $J$  – момент инерции двигателя;  $s$  – оператор Лапласа;  $\omega$  – частота вращения вала двигателя

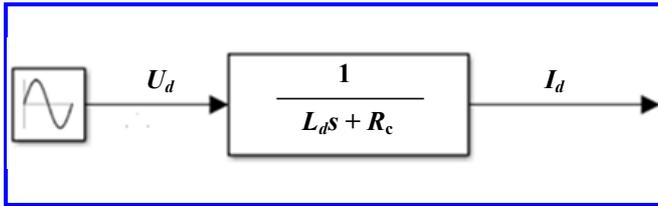


Рис. 2. Структурная схема канала формирования тока СДПМ по оси  $d$

Предварительно на *первом этапе* процедуры идентификации параметров СДПМ следует произвести начальное позиционирование осей  $d - q$  системы координат, направление которых изначально не известно. Для ориентирования оси  $d$  по направлению магнитного потока ротора СДПМ можно воспользоваться частотно-токовой структурой системы управления СДПМ [1] и при задании нулевой частоты тока двигателя реализовать по оси  $d$  номинальный ток, а по оси  $q$  нулевой. После выполненного позиционирования осей  $d - q$  системы координат структурная схема для электрической части по оси  $d$  (рис. 1) упрощается, преобразуясь к виду рис. 2.

Тогда на *втором этапе* идентификации параметров СДПМ появляется возможность определения активного сопротивления обмотки статора  $R_c$  и индуктивности  $L_d$  по оси  $d$  путем частотного анализа передаточной функции между током и напряжением по оси  $d$ , пользуясь ее логарифмическими амплитудно-частотной (ЛАЧХ) и фазо-частотной (ЛФЧХ) характеристиками. С этой целью достаточно подать различной частоты  $\omega_{эл}$  гармонический синусоидальный сигнал задания напряжения по оси  $d$  (рис. 2), определив амплитуды тока  $I_{dm}$  и напряжения  $U_{dm}$  по этой оси и фазовый сдвиг  $\varphi(\omega_{эл})$  между ними для соответствующей частоты  $\omega_{эл}$ . Тогда легко показать [17], что активное сопротивление обмотки статора и индуктивность  $L_d$  по оси  $d$  могут определяться из соотношений:

$$R_c = \sqrt{\frac{U_{dm}^2}{I_{dm}^2} - L_d^2 \omega_{эл}^2}; \tag{1}$$

$$L_d = \frac{\sqrt{\frac{U_{dm}^2}{I_{dm}^2} - R_c^2}}{\omega_{эл}}; \tag{2}$$

или

$$L_d = R_c \frac{\operatorname{tg}\varphi(\omega_{эл})}{\omega_{эл}}. \tag{3}$$

При этом сопротивление  $R_c$  может легко определиться при  $\omega_{эл} = 0$ , что соответствует постоянному напряжению  $U_{dm}$

$$R_c = \frac{U_{dm}}{I_{dm}}. \tag{4}$$

На *третьем этапе* идентификации параметров СДПМ выполняется определение *индуктивности*  $L_q$  по оси  $q$ . Для этого полезно рассмотреть упрощенную структурную схему СДПМ (рис. 3), включающую в себя только основной канал формирования тока по оси  $q$ . Контур регулирования тока по оси  $d$  при этом остается замкнутым при нулевом задании тока  $I_d$ . Статический момент на валу СДПМ предполагается равным нулю, что соответствует режиму идентификации двигателя в режиме его идеального холостого хода.

В структурной схеме рис. 3 присутствует обратная отрицательная связь по ЭДС двигателя, которая может внести погрешность в оценку индуктивности  $L_q$ . Для ее учета следует определить единую передаточную функцию между напряжением  $U_q$  и током  $I_q$  [17], как

$$W(p) = \frac{2Jp}{3p_n^2 \Psi_f^2 \left( \frac{2JL_q}{3p_n^2 \Psi_f^2} p^2 + \frac{2JR_s}{3p_n^2 \Psi_f^2} p + 1 \right)}. \tag{5}$$

Если сравнивать для СДПМ ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточных функций между напряжениями  $U_d, U_q$  и соответствующими им токами  $I_d, I_q$ , представленными на рис. 4 в относительной форме, можно заметить, что основное их отличие находится в области низких частот, где сказывается влияние противо-ЭДС и механической постоянной времени двигателя.

Передаточная функция (5) в этой области частот имеет характер дифференцирующего звена с коэффициентом передачи  $\frac{2J}{3p_n^2 \Psi_f^2}$ . В области высоких частот возмущающих воздействий, на которые СДПМ из-за своей механической инерционности реагировать не успевает, можно принять, что в структурной схеме рис. 3 обратная связь по противо-ЭДС разрывается и канал управления по оси  $q$  становится подобным схеме на рис. 2. Тогда в области высоких частот определение  $L_q$  становится подобным определению  $L_d$ .

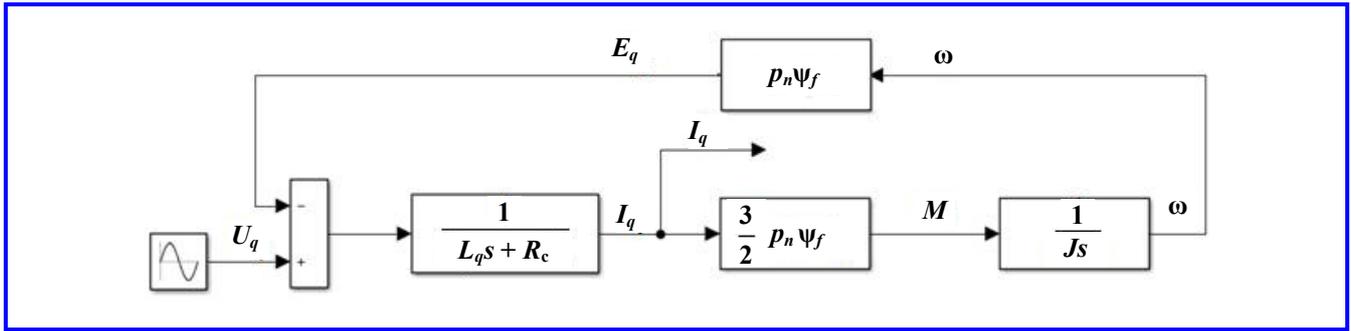


Рис. 3. Структурная схема канала формирования тока синхронного двигателя с постоянным магнитом по оси  $q$

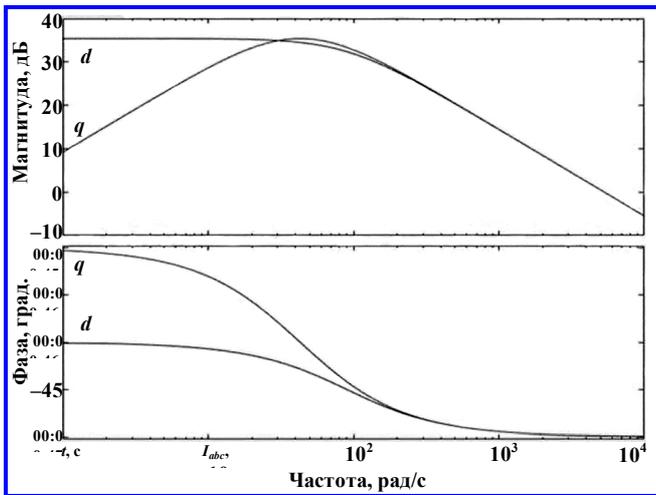


Рис. 4. Сравнительные частотные характеристики по осям  $d$  и  $q$

Для идентификации потокосцепления  $\psi_f$  и момента инерции  $J$  вала СДПМ можно воспользоваться их соотношением

$$J = \frac{3I_{qm} p_n^2 \psi_f^2}{2U_{qm} \omega_{эл}}, \quad (6)$$

справедливым в области низких частот ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточных функций между напряжением  $U_q$  и соответствующим ему током  $I_q$ .

Отсюда на четвертом этапе идентификации параметров СДПМ  $\psi_f$  может определиться на основе его физических процессов [1], как

$$\psi_f = \frac{E}{\omega_{эл}}, \quad (7)$$

$E$  – амплитудное значение ЭДС двигателя;  $\omega_{эл} = \omega_{мех} p_n$  – электрическая скорость вращения вала машины.

В проекциях на оси  $d - q$  ЭДС двигателя возможно определить, как

$$E = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} - \sqrt{\left(I_d \sqrt{R_c^2 + \omega_{эл}^2 L_d^2}\right)^2 + \left(I_q \sqrt{R_c^2 + \omega_{эл}^2 L_d^2}\right)^2}. \quad (8)$$

Реализация и измерение  $\omega_{эл}$  двигателя возможны в частотно-токовой системе его управления [1]. В частном случае, если двигатель будет работать в режиме идеального холостого хода, ток статора в установившемся режиме практически полностью совпадет по направлению с магнитным полем ротора и уравнение (8) можно преобразовать к виду

$$E = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} - I_d \sqrt{R_c^2 + \omega_{эл}^2 L_d^2}. \quad (9)$$

На пятом этапе идентификации СДПМ при вычисленном значении  $\psi_f$  из соотношения (6) может быть определено и значение момента инерции двигателя.

### Пример идентификации синхронных двигателей с постоянными магнитами и ее результаты

Идентификацию реальных параметров СДПМ на основе его частотного анализа можно показать на примере двигателя, проектные технические параметры которого представлены в табл. 1. При экспериментальной идентификации СДПМ питался от преобразователя частоты на основе автономного инвертора напряжения мощностью 7 кВт.

Последовательность идентификации параметров выполнялась в соответствии с описанными ранее этапами и вычислениями. В частности, ЛАЧХ и ЛФЧХ для структурной схемы на рис. 2 представлены на рис. 5 и рис. 6.

Результаты экспериментального определения и вычисления параметров СДПМ приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Проектные технические параметры синхронных двигателей с постоянными магнитами**

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальная мощность $P_{ном}$	5,5 кВт	Индуктивность статора по оси $q$ $L_q$	0,0017 Гн
Номинальный ток $I_{ном}$	14,1 А	Индуктивность статора по оси $d$ $L_d$	0,0017 Гн
Номинальное напряжение $U_{ном}$	110 В	Потокоцепление ротора $\psi_f$	0,106 Вб
Число пар полюсов $p$	3	Момент инерции ротора $J$	0,036 Н·м <sup>2</sup>
Активное сопротивление статора $R_c$	0,153 Ом	Номинальная скорость $\omega_{ном}$	314 рад/с

Таблица 2

**Результаты идентификации синхронных двигателей с постоянными магнитами**

Параметр СДПМ	$\psi_f$ , Вб	$R_c$ , Ом	$L_d$ , Гн	$L_q$ , Гн	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
Паспортный параметр	0,106	0,153	0,0017	0,0017	0,036
Результат идентификации	0,100108	0,279	0,0015637	0,0014212	0,0315
Погрешность, %	5,56	82,35	8,02	16,4	12,5

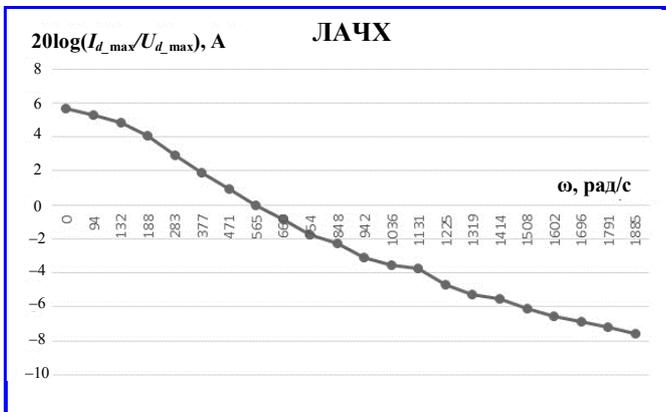


Рис. 5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика контура регулирования тока по оси  $d$

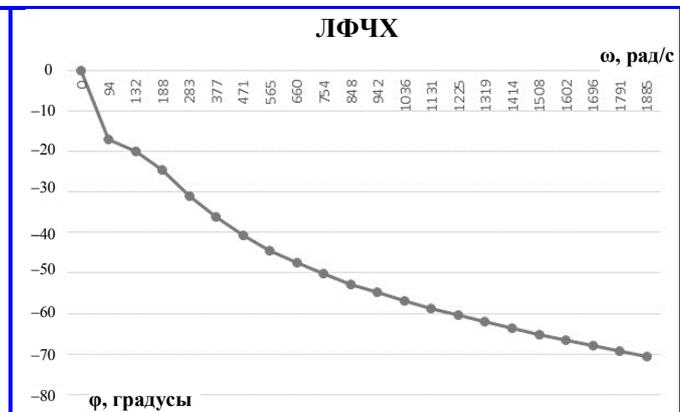


Рис. 6. Логарифмическая фазо-частотная характеристика контура регулирования тока по оси  $d$

Как видно из табл. 2, погрешность определения основных параметров для исследуемого СДПМ составила 16,4% по отношению к заявленным проектным данным, за исключением  $R_c$ , где сказалось влияние внутреннего сопротивления собственно ПЧ, питающего СДПМ.

По окончании идентификации был произведен запуск СДПМ в бездатчиковой векторной системе управления с адаптивным наблюдателем скорости. Осциллограммы тока при пуске представлены на рис. 7.

**Заключение**

Экспериментальная идентификация параметров СДПМ подтвердила возможность применения ее частотного метода при допустимой точности полученных результатов, относительной простоте реализации, минимальных вычислительных и временных затратах. Она выявила и ряд проблем по отношению к теоретическим подходам:

- при оценке активного сопротивления и магнитного потока постоянных магнитов, расчет которых

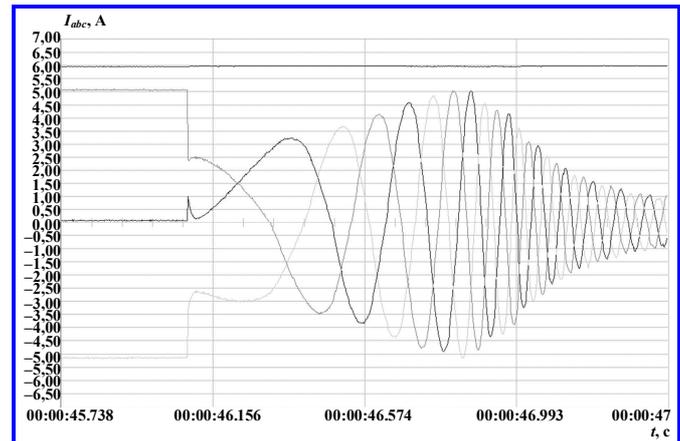


Рис. 7. Осциллограммы токов при пуске СДПМ в бездатчиковой векторной системе управления с адаптивным наблюдателем скорости

производился на каждом периоде широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения ПЧ, приходится для исключения влияния помех в каналах измерения применять инерционные фильтры с достаточно большой постоянной времени с дальнейшим учетом их значений;

– для более точной оценки индуктивностей целесообразнее пользоваться не амплитудными, а действующими значениями напряжений и токов с поправкой на заранее оцененный коэффициент их искажения;

– использование ЛФЧХ при оценках индуктивностей дает заметные ошибки в связи с трудностями точного определения фазы искаженной формы тока;

– прямое применение метода частотных характеристик привязано к линейным свойствам исследуемого объекта. Поэтому определение индуктивностей и потокосцеплений СДПМ, меняющихся при изменении его режимов работы, имеет силу для стационарного режима работы двигателя. Для обобщения результатов экспериментов в изменяющихся режимах работы возможно применение метода гармонической линеаризации частотных характеристик [17];

– для более точной оценки амплитуды и фазы частотных характеристик можно воспользоваться более сложными методами обработки сигналов, например, на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

### Литература

1. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов / А. С. Анучин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2009. – 351 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – Москва : Наука, 1991. – 432 с.
4. Арановский С. В., Бардов В. М. Метод оптимальной идентификации параметров линейного динамического объекта в условиях возмущения / С. В. Арановский, В. М. Бардов // Проблемы управления. – 2012. – № 3. – С. 35 – 40.
5. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В. О. Никифоров. – Санкт-Петербург : Наука, 2003. – 282 с.
6. Саушев А. В., Троян Д. И. Идентификация электроприводов портовых перегрузочных машин / А. В. Саушев, Д. И. Троян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2015. – № 5. – С. 169 – 183.
7. Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами / А. А. Бобцов, А. А. Пыркин, Р. Ортега // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 40 – 45.
8. Базылев Д. Н., Пыркин А. А., Бобцов А. А. Гибридный алгоритм оценки магнитного потока для синхронного двигателя. – Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптике, Санкт Петербург. – Научный доклад. – 2015. – 6 с. – URL : <http://old.elektropribor.spb.ru/cnf/kmu2015/text/033.pdf>. – (Дата обращения : 07.11.2019).
9. Z. Yang, Y. Zhonggang. On-line Identification Methods of Parameters for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Cascade MRAS / Z. Yang, Y. Zhonggang // 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. – 2015. – P. 345 – 350.
10. Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor / T. Marcic, B. Štumberger, G. Štumberger // IEEE transactions on industrial electronics. – 2014. – Vol. 61. – № 11. – P. 5921 – 5929.
11. PMSM Identification Using Genetic Algorithm / A. Avdeev, O. Osipov // 26th International Workshop on Electric Drives : Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – 2019.
12. Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А. А. Анисимов, М. Н. Горячев // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 1 – 5.
13. Гребенникова И. В. Методы оптимизации : учебное пособие / И. В. Гребенникова. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 148 с.
14. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алексей Сергеевич Анучин. – Москва, 2018. – 445 с.
15. Вдовин В. В. Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Владимир Владимирович Вдовин. – Новосибирск, 2014. – 244 с.
16. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю. Н. Калачев. – Москва, 2015. – 81 с. – URL : [elprivod.nmu.org.ua](http://elprivod.nmu.org.ua). – (Дата обращения : 07.11.2019).
17. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 752 с.

Поступила в редакцию 06.12.2019

*Александр Сергеевич Авдеев, аспирант, инженер, e-mail: alex\_ac94@mail.ru, т. (977)-257-58-75.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

*Олег Иванович Осипов, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: osipovoi2015@yandex.ru, т. (916)-979-27-06.  
(Национальный исследовательский университет «МЭИ»).*

## PARAMETERS IDENTIFICATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR BASED ON FREQUENCY ANALYSIS

A. S. Avdeev, O. I. Osipov

*The possibility of using the frequency method to identify the parameters of a permanent magnet synchronous motor PMSM is investigated. An analysis of the known methods for identifying the parameters of such motors showed the advisability of addressing their frequency methods. Based on the mathematical model of PMSM, the possibility of applying the frequency method for identifying its parameters is considered, an example of its practical implementation, confirming the effectiveness of the method, is presented.*

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor, mathematical model, parameter identification, frequency method.

### References

1. Anuchin A. S. Electric Drive Control Systems: Textbook for Higher Education / A. S. Anuchin. – Moscow: MPEI Publishing house/ 2015. – 373 p.
2. Alekseev A. A. Identification and Diagnostics of Systems / A. A. Alekseev, Iu. A. Korablev, M. Iu. Shestopalov. – Moscow: Publishing center ‘Academy’, 2009. – 351 p.
3. Ljung L. System Identification. Theory for the User / L. Ljung. – Moscow: Nauka, 1991. – 432 p.
4. Aranovskiy S. V., Bardov V. M. Method of Optimal Identification of the Linear Dynamic Object Parameters under Disturbance Conditions / S. V. Aranovskiy, V. M. Bardov // Control issues. – 2012. – No. 3. – P. 35 – 40.
5. Nikiforov V. O. Adaptive and Robust Control with Disturbance Compensation / V. O. Nikiforov. – St. Petersburg: Nauka, 2003. – 282 p.
6. Saushev A. V., Troian D. I. Identification of Electric drives of Port Handling Machines / A. V. Saushev, D. I. Troian // Journal ‘Vestnik’ of State University of Maritime and Inland Shipping named after admiral S. O. Makarov. – 2015. – No. 5. – P. 169 – 183.
7. Adaptive Observer of Magnet Flux for Synchronous Motor with Permanent Magnets / A. A. Bobstov, A. A. Pyrkin, R. Ortega // Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics. – 2015. – V. 15. – No. 1. – P. 40 – 45.
8. Bazylev D. N., Pyrkin A. A., Bobstov A. A. Hybrid Algorithm of Magnetic Flux Assessment for Synchronous Motor. – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg. – Scientific report. – 2015. – 6 p. – URL : <http://old.elektropribor.spb.ru/cnf/kmu2015/text/033.pdf>. – (Reference date : 07.11.2019).
9. Z. Yangang, Y. Zhonggang. On-line Identification Methods of Parameters for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Cascade MRAS / Z. Yangang, Y. Zhonggang // 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. – 2015. – P. 345 – 350.
10. Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor / T. Marcic, B. Štumberger, G. Štumberger // IEEE transactions on industrial electronics. – 2014. – Vol. 61. – No. 11. – P. 5921 – 5929.
11. PMSM Identification Using Genetic Algorithm / A. Avdeev, O. Osipov // 26th International Workshop on Electric Drives : Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – 2019.
12. Identification of Electromechanical Systems Using Artificial Neuron Network / A. A. Anisimov, M. N. Goriachev // Vestnik of ISPEU. – 2008. – Edit. 3 – P. 1 – 5.
13. Grebennikova I. V. Methods of Optimization: study guide / I. V. Grebennikova. – Ekaterinburg: UrFU, 2017 – 148 p.
14. Anuchin A. S. Development of Digital Systems for Efficient Control of Sets of Tracing Electrical Equipment of Electric Vehicles: category 05.09.03 ‘Electrotechnical complexes and systems’: thesis for doctoral degree in technical sciences / Aleksey Sergeevich Anuchin. – Moscow, 2018. – 445 p.
15. Vdovin V. V. Adaptive Algorithms of Assessment of Coordinates of Sensorless Alternative Current Electric Drives with Extended Control Range: category 05.09.03 ‘Electrotechnical complexes and systems’: thesis for doctoral degree in technical sciences / Vladimir Vladimirovich Vdovin. – Novosibirsk, 2014. – 244 p.
16. Kalachev Iu. N. Observers of Status in Vector Electric Drive / Iu. N. Kalachev. – Moscow, 2015. – 81 p. – URL: [elprivod.nmu.org.ua](http://elprivod.nmu.org.ua). – (Reference date : 07.11.2019).
17. Besekerskii V. A., Popov E. P. Theory of Automatic Control Systems / V. A. Besekerskii, E. P. Popov. – 4<sup>th</sup> edition, reviewed and supplemented. – Saint Petersburg: Profession, 2003. – 752 p.

*Aleksandr Sergeevich Avdeev, Engineer, Graduate student, tel.: +7 (977)-257-58-75, e-mail: alex\_ac94@mail.ru. (JC «VNIIEEM Corporation»).*

*Oleg Ivanovich Osipov, Doctor of technical science, Professor, tel.: +7 (916)-979-27-06, e-mail: osipovoi2015@yandex.ru. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute»).*