

УДК 681.5.015; 621.313.33

Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей*

Е.В. БОЛОВИН¹

¹ 634034, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, аспирант. E-mail: djon-raptor@mail.ru

Построение систем управления электроприводами с асинхронными двигателями в настоящее время является одним из распространенных направлений в области электротехники и электротехнологий. Эффективная система управления базируется на получении корректных данных, поступающих с датчиков, и известных значениях электромагнитных и электромеханических параметров двигателя. Однако значения параметров асинхронных электродвигателей зависят от теплового состояния и режима работы. Следовательно, есть необходимость в определении текущих значений параметров электродвигателей непосредственно в процессе работы электропривода, что возможно путем проведения динамической идентификации переменных состояния и параметров электродвигателя. Целью данной работы является выбор наилучшего метода идентификации параметров асинхронных двигателей различных мощностей и типоразмеров на основе критического экспертного анализа. Приведен сравнительный анализ существующих на данный момент методов идентификации параметров асинхронных двигателей, представленных в российских и зарубежных литературных источниках. Подробно рассмотрен каждый представленный метод, выявлены сильные и слабые стороны каждого метода. Однако в связи с неполнотой и субъективностью представления методов проведение сравнительного анализа на основании описания каждого метода невозможно. В связи с этим приводится методика критического экспертного анализа методов идентификации параметров асинхронных двигателей и применение данной методики для выявления наилучшего метода идентификации. Представлены результаты критического экспертного анализа в виде таблицы. На основании таблицы выявлен наилучший метод. Рассмотрены и представлены основные проблемы при реализации данного метода как части процедуры идентификации, решение которых приведет к улучшению метода в частности и процедуры идентификации в целом.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, идентификация параметров, анализ частотных характеристик, каталожные данные асинхронного электродвигателя, измерение активных и реактивных мощностей, нейронные сети, генетические алгоритмы, алгоритмы фаззи-логики, алгебраические методы идентификации, критический экспертный анализ

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-7-27

* Статья получена 28 августа 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

Построение систем управления электроприводами с асинхронными двигателями в настоящее время является одним из распространенных направлений в области электротехники и электротехнологий. Эффективная система управления базируется на получении корректных данных, поступаемых с датчиков, и известных значениях электромагнитных и электромеханических параметров двигателя. Однако значения параметров асинхронных электродвигателей зависят от теплового состояния и режима работы. Например, в режиме прямого пуска индуктивность может измениться на 30...40 %, а активное сопротивление ротора – более чем в полтора раза. В свою очередь, активное сопротивление статорной обмотки, зависящее от теплового состояния, может изменяться на 20...30 % в процессе работы двигателя. Данное явление особенно характерно для повторно-кратковременного режима [1–3]. Следовательно, есть необходимость в определении текущих значений параметров электродвигателей непосредственно в процессе работы электропривода, что возможно путем проведения динамической идентификации переменных состояния и параметров электродвигателя.

В настоящее время разработано множество методов, посвященных идентификации электромагнитных и электромеханических параметров асинхронного двигателя, основанных на разных принципах их проведения и работы в целом. Однако не существует универсального метода идентификации, и каждый из них имеет свои недостатки и преимущества. Целью данной работы является выбор наилучшего метода идентификации параметров асинхронных двигателей различных мощностей и типоразмеров на основе сравнительного анализа существующих на данный момент методов, представленных в российских и зарубежных литературных источниках; выявление сильных и слабых сторон каждого метода и проведение независимого критического экспертного анализа методов идентификации параметров асинхронных двигателей.

1. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Одним из способов идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей является анализ частотных характеристик. Работу [4] можно считать одной из первых работ, относящихся к данной группе методов определения параметров асинхронного электродвигателя. Метод позволяет определить значение индуктивного сопротивления ротора асинхронной машины. Данные для вычисления параметров берутся из опытов холостого хода, варьируя скорость ротора, при этом ротор раскручивают посторонним двигателем. Оценки индуктивных сопротивлений ротора получаются устойчивыми и с погрешностью не более 7 %. Основными недостатками метода являются получение только одного электромагнитного параметра и необходимость вывода из работы двигателя для проведения процедуры идентификации.

Определения всех электромагнитных параметров статора представлены в работе [5]. Метод основан на анализе частотных характеристик, полученных из опытов затухания постоянного тока в обмотке статора. Однако для проведения таких опытов необходимо наличие регулируемого источника переменного напряжения, вывод из эксплуатации и частичный разбор двигателя.

В результате исследования методов, представленных в [5], получен метод, изложенный в работе [6]. Суть метода аналогична предыдущему. Единственным отличием является возможность дополнительного определения действующего значения ЭДС двигателя, что привело к усложнению метода.

Интересной работой является [7]. Автор предлагает находить сопротивления статора и ротора асинхронного электродвигателя не в явном виде, а через проводимости. Необходимые данные снимаются при подаче переменного напряжения в статорный контур при неподвижном роторе и регистрации мгновенных значений тока до затухания переходного процесса. К сожалению, погрешность оценок активных сопротивлений составляет более 10 %.

Другая методика определения параметров асинхронного двигателя с помощью анализа частотных характеристик базируется на анализе гармоник мгновенной мощности при питании АД от источника полигармонического напряжения [8], при этом составляющие мощности определяются для каждого элемента отдельно. Погрешность оценок параметров составляет не более 7 %. Однако для реализации данного метода необходимо использовать источник низкочастотного напряжения.

Развитие [8] привело к созданию подобных методов с единственным отличием: для питания асинхронного электродвигателя используют синусоидальный источник, а необходимый спектр частот получают от фиктивного источника, который вводится искусственно, в виде математической поправки в баланс мощностей [9, 10]. Данная методика уменьшает погрешность оценок до 6 %.

Работы [4–14], относящиеся к группе методов определения параметров асинхронных двигателей на основе анализа частотных характеристик, имеют общие недостатки:

1) необходимость вывода из работы электродвигателя, что делает невозможным использование данных методов для создания автоматических и адаптивных систем управления электроприводами;

2) частотный анализ, представленный в работах [5–8], является упрощенным и не учитывает многоконтурность ротора и насыщение путей магнитных потоков, что приводит к большим погрешностям идентификации параметров асинхронных электродвигателей;

3) необходимость применения методик экспериментального определения частотных характеристик [9–14] исходя из п. 2, что приводит к усложнению всей системы идентификации и ухудшению быстродействия;

4) не учитываются изменения всех параметров электродвигателя в зависимости от температуры и режимов работы.

2. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ

Следующим способом идентификации электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей является определение параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей по каталожным данным. Данная методика распространена в инженерской практике.

Основой развития данного способа можно считать работы [15–20]. В данных работах определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя проводится по приближенным формулам, полученным из уравнений равновесия, описывающих схему замещения электродвигателя. Основными недостатками метода являются низкая точность идентификации и определение параметров только серийных двигателей.

Усовершенствование [15–20] привело к созданию работы [21], которая является хорошим примером определения параметров асинхронных машин по каталожным данным. С помощью данного метода можно определить активное и индуктивное сопротивление статора, приведенные к статору активное и индуктивное сопротивление ротора и индуктивное сопротивление цепи намагничивания асинхронных электродвигателей серии 5А в диапазоне мощностей от 1,5 до 250 кВт. Особенностью работы [21] является получение заведомо завышенной оценки активного сопротивления статора и заниженного значения приведенного к статору активного сопротивления ротора. В связи с этим автор проводит скрупулезный анализ данных погрешностей для двигателей различной мощности и дает советы по снижению риска получения недостоверной информации. Достоинством работы [21] является определение параметров с учетом явления вытеснения тока в стержнях обмотки ротора, зависящее от глубины паза. Однако автор признается, что малое значение глубины паза приводит к неустойчивости решения. К основным недостаткам работы относятся: получение погрешностей оценок при пуске двигателя любой мощности до 20 %; неприемлемость использования данного метода для маломощных двигателей до 5 кВт, так как погрешность может достигать 30 %.

Другая методика определения параметров асинхронных двигателей описана в работе [22]. В отличие от [21], в работе [22] определяются все параметры схемы замещения, включая активное сопротивление цепи намагничивания. Также получение оценок активных сопротивлений статора и ротора построено с учетом их изменения в зависимости от температуры. К сожалению, методика сведена только к определению данных параметров при нерабочем двигателе и при номинальном режиме работы с усредненной температурой обмоток. Еще один минус – возможность применения данного метода только к маломощным двигателям.

Методы, предложенные в работах [21] и [22], являются слишком сложными и громоздкими. Их развитием можно считать [23] благодаря простоте расчета и точности получаемых оценок. Данная методика не нуждается в априорных расчетах коэффициента приведения и дальнейшего анализа полученных оценок параметров и их перерасчетов, кроме приведенного к статору активного сопротивления ротора. Однако из-за облегчения метода появляется

необходимость измерения реактивной потребляемой мощности для получения оценки индуктивного сопротивления цепи намагничивания. Еще одним недостатком является применение рассмотренной методики для асинхронных электродвигателей с мощностью выше 30 кВт.

Определение всех параметров схемы замещения АД любой мощности серий 4А, А4 и АД представлено в [24]. Ярким моментом в работе можно считать учет зависимости активного и индуктивного сопротивлений ротора от скольжения. К еще одному положительному моменту можно отнести то, что по данной методике возможно определить параметры на основе экспериментальных данных, к сожалению, снимать которые необходимо в трех отдельных режимах. Оценки параметров схемы замещения имеют погрешность не более 15 %, что допустимо для инженерской практики, однако полностью не подходит для построения систем диагностики и управления.

Усовершенствование [24] привело к созданию метода, представленного в [25]. В работе [25] средняя погрешность оцениваемых параметров снизилась до 5 % за счет усложнения расчета, что приводит к громоздкости системы. Данный метод, как и представленный в [25], подходит для двигателей серий 4А, А4 и АД, что не гарантирует правильности определения параметров двигателей более новых серий 5А и 6А.

Работы [16–25], относящиеся к группе методов определения параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей по каталожным данным, имеют общие недостатки:

1) определение параметров только серийных двигателей, т. е. непригодны для двигателей индивидуального исполнения, которые зачастую встречаются на производстве, например для асинхронных двигателей электроцентробежных погружных насосов, механизмов «мотор–колесо»;

2) необходимость сбора априорной информации в режимах холостого хода, короткого замыкания и номинальной работы для уменьшения погрешности оценок, что приводит к невозможности использования данной группы методов для идентификации параметров двигателей в реальном времени с большой точностью;

3) не учитываются изменения всех параметров электродвигателя в зависимости от температуры и режимов работы.

3. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ

Другой способ идентификации параметров асинхронных электродвигателей основывается на сборе информации с датчиков тока, напряжения, активной и реактивной мощностей и скорости.

Одни из первых работ данной группы [26–29] использовали данные, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания. Однако определить значения параметров можно было только для асинхронных машин нормального исполнения в связи с принимаемым условием, что индуктивность намагничивающего контура намного превосходит индуктивность, обуслов-

ленную полем рассеяния статора. Еще одним недостатком является необходимость предварительного измерения сопротивления статорной обмотки при подаче на нее постоянного тока.

Метод определения всех электромагнитных параметров асинхронного двигателя представлен в работе [30]. Данный метод является довольно простым в реализации и основывается на записи необходимых данных с датчиков активной и реактивной мощностей, токов и напряжений статора и дальнейшей работе с ними. Однако автор признается, что значение активного сопротивления статора получаются завышенным, и связывает это с тем, что в снимаемую электрическую мощность входит мощность потерь в магнитопроводе, не учитываемая в схеме замещения. К основному недостатку метода относится получение больших погрешностей оценок активного сопротивления ротора и индуктивности рассеяния. Для уменьшения погрешности предлагается пересчитывать оценки данных параметров на каждом этапе при получении их значений на предыдущем, что значительно снижает быстрдействие метода.

В работе [31] предложена методика определения параметров асинхронного электродвигателя, учитывающая насыщение ветви намагничивания и ее влияние на индуктивные сопротивления. Особенности метода являются разложение и перенос ветви намагничивания в схемах замещения двигателя; снятие сигналов датчиков тока, напряжения и мощности с учетом полученных схем и дальнейшая идентификация параметров на каждом этапе. К сожалению, данная методика подходит только для двигателей серийного производства средней и большой мощности, а погрешность в среднем составляет 10 %.

Отличие от работ [26–31], метод, представленный в [32], базируется на получении информации с датчиков в следующих двух режимах: холостой ход и работа двигателя с заторможенным ротором. Последний режим реализуется при питании статора асинхронного электродвигателя пониженным напряжением. К недостаткам метода относятся: необходимость предварительного измерения активного сопротивления статора двигателя и невозможность определения индуктивности, обусловленной магнитным потоком в воздушном зазоре электродвигателя.

Одним из методов идентификации с получением малой погрешности оценивания можно считать работу [33]. Метод аналогичен представленному в [30], отличием является получение информации в других режимах работы двигателя: пуск и дальнейшая работа на холостом ходу. К сожалению, при высокой точности метод применим только к серийным асинхронным машинам мощностью 1 МВт и выше.

Работа [34] совершенно отличается от предыдущих работ данной группы методов, так как основной целью является определение вращающего момента асинхронного двигателя. Метод основан на получении информации с датчиков токов, напряжения, скорости и мощности. К достоинствам работы можно отнести следующее: предложена методика определения электромагнитного момента асинхронного двигателя с учетом влияния вихревых токов и поверхностного эффекта в стержнях ротора; погрешность оценки электромагнитного момента двигателя во время работы на холостом ходу составляет не более 5 %. Однако в течение пуска двигателя данная погрешность достигает 20 %.

Недостатки данной группы, основывающейся на сборе информации с датчиков:

1) необходимость использования большого количества датчиков, таких как датчики тока, напряжения, активной и реактивной мощности, скорости, что усложняет и повышает стоимость системы в целом, а также понижает ее отказоустойчивость;

2) невозможность применить к некоторым видам приводов в связи с невозможностью или сложностью установки всех необходимых датчиков;

3) не учитываются изменения всех параметров электродвигателя в зависимости от температуры и режимов работы.

4. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В настоящее время получило распространение построение систем оценки параметров асинхронных машин на основе искусственных нейронных сетей. В работе [35] представлено данное построение на основе уравнений, описывающих переходные процессы потокосцеплений, тока и скорости асинхронного двигателя (АД); представлено построение схемы нейронов и количество слоев. Однако нет описания обучения такой системы, а неправильное обучение может привести к неточности получаемых результатов или «распаду» процедуры идентификации [36].

Дальнейшим развитием применения нейронной сети является работа [37], где представлено построение системы идентификации и управления скоростью крутящего момента АД, базирующейся на получении информации до и после ШИМ-модулятора. В данной работе представлен полный алгоритм обучения сети и сравнение управления скоростью с помощью разработанного метода и обычного способа управления замкнутой системой. Недостатком является построение сложной нейронной сети, на реализацию которой необходимы большие вычислительные затраты.

Доработка [36] и [37] привела к созданию бездатчиковых идентификационных моделей АД [38, 39]. Оба метода базируются на представлении ориентации поля, создаваемого ротором, измерении потокосцепления ротора и дальнейшей идентификации электрических параметров АД и его скорости. Работы [38] и [39] предназначены для построения адаптивных систем, однако в связи с необходимым измерением потокосцепления такие системы являются сложными и дорогими в реализации.

В работе [40] представлена синтезированная система нейронной сети с фильтром Калмана, где фильтр является моделью исследуемого двигателя, нейронная сеть – системой идентификации, информация для которой поступает как с реального объекта, так и с модели. Такая синтезированная система предназначена для идентификации скорости, крутящего момента и электромагнитного потока. Соответственно, ее применение возможно лишь для построения бездатчиковых электроприводов, а не для адаптивных систем управления.

Отдельной группой можно выделить работы [41–51], описанные методы идентификации параметров асинхронных электродвигателей, основываю-

щиеся на нейронных сетях. Автор данных работ представляет различные вариации обучения нейронных сетей и возможный синтез с генетическими алгоритмами и фаззи-логикой. Достоинствами работ [41–51] являются: обширное описание настройки и обучения сетей, необходимые условия и возможные проблемы при обучении, дальнейшее применение полученных результатов для построения диагностических систем. К сожалению, автор ни в одной из работ не приводит значения получившихся оценок и сравнения их с реальными значениями параметров, представлено лишь сравнение переходных процессов токов и скорости асинхронного двигателя, записанных с помощью датчиков и полученных в ходе моделирования с найденными оценками параметров.

Интересной является работа [52]. В данной работе представлена методика построения системы диагностики потокоцепления с частичной идентификацией параметров двигателя. Предложенная диагностическая система строится на обучении нейронных сетей. Погрешность оценивания потокоцепления составляет не более 8 %. Однако необходимо точно знать значения электромеханических параметров статора и снимать данные с датчика момента.

Недостатками систем идентификации на основе нейронных систем являются:

- 1) невозможность получения оценок параметров асинхронного электродвигателя в реальном времени в связи с необходимостью предварительной записи информации, необходимой для диагностики;
- 2) возможность избавления от п. 1 за счет построения систем предсказания, что усложняет и повышает стоимость всей системы, понижает ее отказоустойчивость;
- 3) необходимость и сложность правильного обучения нейронных сетей.

5. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Другой вид построения систем оценки параметров основан на применении генетических алгоритмов. Ярким примером является работа [53], где на основе математического описания была создана модель асинхронного двигателя, сняты переходные процессы токов и напряжений двигателя и на основе данной информации определены активные сопротивления и индуктивности ротора и статора, момент инерции двигателя. Там же было показано влияние частоты питающей сети на ошибку идентификации. При получении практически всех электрических параметров минусом представленного метода является получение оценок с погрешностью в среднем порядка 19 %.

В работе [54] представлен интересный момент – геометрический анализ ротора, основанный на генетическом алгоритме. Здесь представлена возможность получения информации о распространении электромагнитного поля в роторе на основе поступающей от объекта информации.

Работу [55] можно считать развитием [53] благодаря улучшению методики идентификации, основанной на генетических алгоритмах с помощью

применения весовых коэффициентов. Полученные оценки отличаются от реальных значений электрических параметров АД не более чем на 1,5 %, кроме сопротивления статора, где погрешность в начале исследования – 52 % и со временем уменьшается до 4,3 %. Однако, процедура идентификации занимает значительную часть времени и вычислительной мощности, связанных с перерасчетом оценок на каждом этапе получения оценок. В работе данный перерасчет называется «этап генерации (generation)». В среднем один этап занимает одну секунду, а как сказано авторами, «для получения стабильных и точных оценок необходимо 74 этапа».

Недостатками систем идентификации на основе генетических алгоритмов являются:

1) невозможность получения оценок параметров асинхронного электродвигателя в реальном времени в связи с необходимостью предварительной записи информации, необходимой для диагностики;

2) возможность избавления от п. 1 за счет построения систем предсказаний, что усложняет и повышает стоимость всей системы, понижает ее отказоустойчивость.

6. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ФАЗЗИ-ЛОГИКИ

Следующая группа – это методы создания адаптивной системы управления приводами переменного тока на основе алгоритмов фаззи-логики с частичной идентификацией параметров двигателя. В работах [56–60] представлены методики создания такой системы для приводов в различных отраслях с учетом изменения как внешних воздействий, так и изменения части параметров электродвигателя. К сожалению, построение таких систем является громоздким, требует больших вычислительных затрат и нет возможности оценивания индуктивных сопротивлений машины переменного тока. Еще одним минусом данной группы методов является необходимость привлечения опытного эксперта по настройке элементов фаззи-логики.

7. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Также распространение получили системы идентификации параметров двигателей на основе алгебраических методов. Одна из таких разработок [61] позволяет определить сопротивление и индуктивность статора, постоянную времени ротора на основе информации, получаемой с датчиков тока, напряжения и угла поворота, дальнейшей их обработки, создания системы уравнений и ее решения методом наименьших квадратов (МНК). Работа [61] интересна сравнением различных методов наименьших квадратов в решении системы уравнений, таких как обобщенный МНК, взвешенный МНК и двухшаговый МНК.

Идентификационная модель, представленная в работе [62], основана на том же принципе. Однако из-за представления математического описания двигателя в другом конечном виде, отличном от предложенного в [61], данная модель определяет значения активных сопротивлений и индуктивностей статора и ротора. В работах [61, 62] погрешность вычислений составляет не более 7 %, однако недостатком является определение только части электрических параметров. Работа [63] является доработанной версией работ [61, 62], что позволяет определять все электромагнитные параметры асинхронного двигателя в реальном времени с погрешностью не более 7 %.

8. ОБОБЩЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведенный анализ работ [4–62] не дает полной картины эффективности, работоспособности и возможности выявления наилучшего метода идентификации параметров асинхронных двигателей. Соответственно, необходимо использовать методику, которая может дать полную и объективную информацию о каждом методе идентификации и провести их сравнительный анализ. Для этого воспользуемся методом, представленным в работах [64, 65], – критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей. Для применения данного анализа сформируем критерии, необходимые для достижения наилучших показателей работоспособности методов.

1. Высокая точность процедуры идентификации.
2. Быстродействие метода идентификации.
3. Определение значений параметров без необходимости вывода из работы двигателя.
4. Определение значений параметров без необходимости сбора априорной информации.
5. Возможность определения всех параметров одновременно.
6. Простота системы идентификации, заключающаяся в легкой установке, настройке необходимых программ и использовании их оператором.
7. Возможность использования методики идентификации параметров асинхронных двигателей индивидуального исполнения.
8. Универсальность системы идентификации параметров асинхронных двигателей, т. е. работа без помощи других методик, работающих параллельно, или без предварительной настройки систем идентификации.
9. Возможность идентификации параметров асинхронных двигателей с учетом их изменения.
10. Использование малого количества записывающих устройств и устройств сбора информации.

Результаты критического экспертного анализа методов идентификации параметров асинхронных двигателей сведены в таблицу.

Критерии в таблице записаны в виде цифр, по мере их нумерации (см. выше) и обозначены K_1 – K_{10} соответственно, P_i – ранжирование каждого критерия, $ВК_i$ – весовой коэффициент для каждого критерия, E_i – оценка экс-

перта соответствия каждому критерию, R_i – приведенная оценка с учетом весового коэффициента соответствия каждому критерию. Методы идентификации пронумерованы следующим образом:

М1 –методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе анализа частотных характеристик [4–15];

М2 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей по каталожным данным [16–25];

М3 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе измерения активной и реактивной мощностей [26–34];

М4 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе нейронных сетей [35–52];

М5 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе генетических алгоритмов [53–55];

М6 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе алгоритмов фаззи-логики [56–60];

М7 – методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе алгебраических методов [61, 62].

Суть критического экспертного анализа методов идентификации параметров асинхронных двигателей заключается в следующем: эксперт после анализа каждой группы методов выставляет оценку по каждому критерию (3 – полностью соответствует критерию, 1 – полностью не соответствует критерию). Далее критериям выставляется уровень ранжирования, который напрямую зависит от важности данного критерия из общего списка (10 – наиболее важный, 1 – наименее важный). Затем вычисляется весовой коэффициент для каждого критерия следующим образом:

$$BK_i = \frac{P_i}{\sum P_i}.$$

Далее получаем приведенную оценку с учетом весового коэффициента соответствия каждому критерию:

$$R_i = BK_i \cdot E_i.$$

Все приведенные оценки с учетом весового коэффициента суммируются и записываются в столбик «сумма». Наиболее успешной будет считаться группа методов, набравшая наибольшее значение суммы.

Проведем критический экспертный анализ для первой группы методов М1 по первому критерию К1. Эксперт поставил оценку по данному критерию 2, означающую, что методы идентификации параметров асинхронных двигателей на основе анализа частотных характеристик имеют точность процедуры ниже, чем допускается в электроприводах, но достаточную для инженерской практики. Уровень ранжирования критерия К1 – 7, т. е. критерий является четвертым по важности. Так как сумма всех уровней ранжирования равна 55, то весовой коэффициент для К1 составит 0,13. Вычисляем приведенную оценку с учетом весового коэффициента, которая равна 0,26. Такие операции проводим для каждой группы методов по каждому критерию.

**Критический экспертный анализ методов идентификации параметров
асинхронных двигателей**

M \ K		Критерий										Сумма
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	
M1	E_i	2	2	1	3	2	1	3	1	1	2	18
	R_i	0,26	0,22	0,18	0,216	0,32	0,018	0,162	0,036	0,14	0,18	1,732
M2	E_i	1	3	2	1	3	3	1	2	1	3	20
	R_i	0,13	0,33	0,36	0,072	0,48	0,054	0,054	0,072	0,14	0,27	1,962
M3	E_i	2	2	2	3	3	3	1	3	1	1	21
	R_i	0,26	0,22	0,36	0,216	0,48	0,054	0,054	0,108	0,14	0,27	2,162
M4	E_i	2	2	3	1	3	1	3	1	3	3	22
	R_i	0,26	0,22	0,54	0,072	0,48	0,018	0,162	0,036	0,42	0,27	2,478
M5	E_i	3	1	3	1	3	1	3	3	3	3	24
	R_i	0,39	0,11	0,54	0,072	0,32	0,018	0,162	0,108	0,42	0,27	2,41
M6	E_i	2	2	3	3	2	2	3	2	2	2	23
	R_i	0,26	0,22	0,54	0,216	0,48	0,036	0,162	0,072	0,28	0,18	2,446
M7	E_i	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	28
	R_i	0,26	0,33	0,51	0,216	0,48	0,036	0,162	0,108	0,42	0,27	2,792
P_i		7	6	10	4	9	1	3	2	8	5	55
BK_i		0,13	0,11	0,18	0,072	0,16	0,018	0,054	0,036	0,14	0,09	

На основе анализа таблицы можно утверждать, что создание процедур для динамической оценки параметров асинхронных двигателей наиболее успешно на основе алгебраических методов, так как не требует больших вычислительных мощностей, создания сложных систем, сбора предварительной информации и ее записи, при этом обеспечивая оценку параметров в режиме реального времени и с допустимыми для систем электропривода погрешностями. Однако дальнейшее развитие данных методов связано с решением следующих проблем:

- 1) определение значений всех электромагнитных параметров машин переменного тока в режиме реального времени;
- 2) сложность избавления от стационарных и импульсных шумов в измерительной системе;
- 3) дискретизации сигналов измерительной системы по времени и квантование по уровню;
- 4) линейная зависимость столбцов и строк идентификационной матрицы;
- 5) необходимость фильтрации полученных оценок.

ВЫВОДЫ

1. Приведено описание основных методов идентификации параметров асинхронных двигателей, применяемых в настоящее время. Были рассмотрены различные способы реализации данных методов, представленные в российских и зарубежных литературных источниках. Выявлены сильные и слабые стороны каждого метода идентификации.

2. В связи с недостаточностью и субъективностью представления методов и, соответственно, невозможностью проведения сравнительного анализа был представлен и применен критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей. Все результаты экспертного анализа сведены в таблицу.

3. Установлено, что создание процедур для динамической оценки параметров асинхронных двигателей наиболее успешно на основе алгебраических методов, так как не требует больших вычислительных мощностей, создания сложных систем, сбора предварительной информации и ее записи, при этом обеспечивая оценку параметров в режиме реального времени и с допустимыми для систем электропривода погрешностями, что подтверждается результатами критического экспертного анализа методов идентификации.

4. Сформулированы основные проблемы, возникающие при создании процедур для динамической идентификации на основе алгебраических методов, решение которых приведет к улучшению процедуры идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каширских В.Г.* Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: монография. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. – 139 с.

2. *Макаров В.Г.* Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань, 2011. – 40 с.

3. *Воронин А.А.* Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем высоковольтных коммутационных аппаратов с удлиняющейся дугой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2009. – 19 с.

4. А.с. 116795 СССР, МКИ G 01 R 31/34. Способ определения индуктивных сопротивлений асинхронной двухфазной машины / Н.Г. Широков. – № 588176; заявл. 19.12.57; опубл. 01.01.58, Бюл. № 5. – 5 с.

5. А.с. 1372259 СССР, МКИ G 01 R 31/34. Способ определения активных и индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки ротора асинхронного двигателя / Г.Г. Рогозин, Ю.И. Печуркин, Н.Г. Пятлина, В.И. Алексеев. – № 4092032/24-07; заявл. 24.07.86; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5. – 7 с.

6. А.с. 1295347 СССР, МКИ G 01 R 31/34. Способ определения активного, индуктивного сопротивлений и ЭДС асинхронного двигателя по высшим гармоникам / С.И. Кузовков, Н.Г. Широков. – № 3927765/24-07; заявл. 11.07.85; опубл. 07.03.87, Бюл. № 9. – 5 с.

7. А.с. 1780062 СССР, G 01 R 31/34. Способ определения частотной характеристики проводимости асинхронной машины / Г.Г. Рогозин, Н.Г. Пятлина, Ю.И. Печуркин, Н.С. Лапшина, В.В. Бабий. – № 4881107/22; заявл. 11.11.90; опубл. 07.12.92, Бюл. № 45. – 6 с.

8. *Резник Д.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В.* Особенности определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей при использовании низкочастотного испытательного напряжения // Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 13–16 марта 2007 г. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2007. – С. 279–283.

9. Родькин Д.И. Решение одного класса некорректных электротехнических задач энергетическим методом // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – Вип. 1 (21). – С. 69–80.
10. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter identification scheme for induction motors using output inter-sampling approach // *Asian Power Electronics Journal*. – 2008. – Vol. 2, N 1. – P. 15–22.
11. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Пути повышения технико-экономических показателей и развития теории электрических машин // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – 2001. – № 17. – С. 24–27.
12. Казовский Е.Я., Рубисов Г.В. Переходные процессы в синхронных машинах при аномальных режимах в энергосистеме. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
13. Rechberger K., Koeffler H. Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine // *15th International Conference on Electrical Machines "ICEM 2002"*, August 25–28, 2002. – Brugge, Belgium, 2002. – P. 25–28.
14. Larin A., Lamary A. Computer simulation of the transient in AC machines at short-circuits and connections to a network on the basis of the experimental frequency-response characteristics // *9th International Symposium on Short-circuit currents in power systems, SCC'2000*, October 11–13, 2000. – Cracow, 2000. – P. 39–45.
15. Ларин А.М., Ламари А., Ларина И.И. Экспериментальное определение частотных характеристик асинхронных машин при различных уровнях насыщения // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 52–58.
16. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.
17. Слударж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
18. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1980. – 890 с.
19. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
20. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
21. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным [Электронный ресурс] / [Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем]. – URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (дата обращения: 19.03.2015).
22. Свит П.П., Семкин Б.В. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности // *Ползуновский альманах*. – 2004. – № 3. – С. 96–99.
23. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.
24. Моцинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
25. Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data / K. Lee, S. Frank, P.K. Sen, L. Gentile Polese, M. Alahmad, C. Waters // *Proceedings 2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 9–11 Sept. 2012. – Urbana, Illinois, 2012. – P. 1–6. – doi: 10.1109/NAPS.2012.6336384.
26. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
27. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы / *Донецкий политехнический институт*. – Київ: Техніка, 1992. – 168 с.
28. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник. – Л.: Энергия, 1985. – 840 с.
29. ГОСТ 7217–87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 7217-79; введен 01.01.1988. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 52 с.
30. Чепкунов Р.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по паспортным данным при вводе в эксплуатацию асинхронного электропривода // *Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах*. – 2013. – № 4. – С. 56–62.

31. Сидельников Б.В., Рогачевская Г.С. Корректировка метода опытного определения параметров асинхронных двигателей // XIV международная научно-техническая конференция «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», 17–22 сентября 2007 г.: сборник научных трудов. – Днепропетровск: Изд-во ДГТУ, 2007. – С. 167–168.

32. IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators: IEEE Std. 112–1996. – New York: IEEE Power Engineering Society, 1997. – 64 p. – doi: 10.1109/IEEESTD.1997.82360.

33. Babau R., Boldea I. Parameter identification for large induction machines using direct online startup test // Workshop on Electrical Machines Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 26th of May 2001. – Cluj, Romania, 2001. – P. 47–52.

34. Винокуров М.Р., Моисеенко А.А., Масловцева Н.Ю. Повышение точности расчета вращающего момента асинхронного двигателя с учетом поверхностного эффекта в стержнях ротора // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 5 (56). – С. 621–629.

35. On-line parameter identification using artificial neural networks for vector controlled induction motor drive / B. Karanayil, M.F. Rahman, G. Grantham, M.A. Rahman // 3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004, 28–30 December 2004. – Dhaka, Bangladesh, 2004. – P. 23–26.

36. Бонгард М.М. Проблема узнавания. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 319 с.

37. A neural network based space vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive / J.O.P. Pinto, B.K. Bose, L.E. Borges, M.P. Kazmierkowski // IEEE Transaction on Industry Applications. – 2000. – Vol. 36, iss. 6. – P. 1628–1636. – doi: 10.1109/28.887215.

38. Gadoue S.M., Giaorus D., Finch J.W. Low speed operation improvement of MRAS sensorless vector control induction motor drive using neural network flux observers // 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON 2006, Paris, France, 6–10 November 2006. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2006. – P. 1212–1217. – doi: 10.1109/IECON.2006.347284.

39. Loukianov A.G., Sánchez E.N., Félix R.A. Induction motor VSC control using neural networks // Proceedings of the 15th Triennial World Congress IFAC'2002, 21–26 July 2002. – Barcelona, Spain, 2002. – Vol. 15, pt. 1. – P. 450–457. – doi: 10.3182/20020721-6-ES-1901.01073.

40. Application of EKF to parameters estimation for speed sensorless and neural network control of an induction motor / K. Yazid, R. Ibtouen, O. Touhami, M. Fadel // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power System, September 22–24 2006. – Lisbon, Portugal, 2006. – P. 279–283.

41. Bose B.K. Neural network applications in power electronics and motor drives – an introduction and perspective // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, iss. 1. – P. 14–33. – doi: 10.1109/TIE.2006.888683.

42. Mondal S., Pinto J.O.F., Bose B.K. A neural network based space vector PWM controller for a three-level voltage-fed inverter induction motor drive // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – Vol. 38, iss. 3. – P. 660–669. – doi: 10.1109/TIA.2002.1003415.

43. Bose B.K. Artificial neural network applications in power electronics // The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON '01, November 29–December 2 2001. – Denver, Colorado, USA, 2001. – Vol. 3. – P. 1631–1638. – doi: 10.1109/IECON.2001.975533.

44. Self turning controller for induction motor drives / W.S. Oh, B.K. Bose, K.M. Cho, H.J. Kim // IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02, 5–8 November 2002. – Sevilla, Spain, 2002. – Vol. 1. – P. 152–156. – doi: 10.1109/IECON.2002.1187498.

45. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive // Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, IECON '98, 31 August–4 September 1998. – Aachen, Germany, 1998. – Vol. 2. – P. 733–739. – doi: 10.1109/IECON.1998.724184.

46. Hui L., Ozpineci B., Bose B.K. A soft-switched high frequency non-resonant link integral pulse modulated DC-AC converter for AC motor drive // Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, IECON '98, 31 August–4 September 1998. – Aachen, Germany, 1998. – Vol. 2. – P. 726–732. – doi: 10.1109/IECON.1998.724183.

47. da Silva L.E.B., Bose B.K., Pinto J.O.P. Recurrent-neural-network-based implementation of a programmable cascaded low-pass filter used in stator flux synthesis of vector-controlled induction motor drive // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. – Vol. 46. – P. 662–665.

48. *Zhao J., Bose B.K.* Neural-network-based waveform processing and delayless filtering in power electronics and AC drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – Vol. 51, iss. 5. – P. 981–991. – doi: 10.1109/TIE.2004.834949.
49. *Kim M.H., Simoes M.G., Bose B.K.* Neural network-based estimation of power electronic waveforms // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1996. – Vol. 11, iss. 2. – P. 383–389. – doi: 10.1109/63.486189.
50. *Simoes M.G., Bose B.K.* Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive // IEEE Transactions on Industry Application. – 1995. – Vol. 31, iss. 3. – P. 620–629. – doi: 10.1109/28.382124.
51. *Bose B.K.* Intelligent control and estimation in power electronics and drives // IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, 18–21 May 1997. – Milwaukee, Wisconsin, 1997. – P. TA2/2.1–TA2/2.6. – doi: 10.1109/IEEMDC.1997.604201.
52. *Chun T.-W., Choi M.-K., Bose B.K.* A novel start-up scheme of stator flux oriented vector controlled induction motor drive without torque jerk // Proceedings of the 36th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications (IAC'01), 30 September 2001–4 October 2001. – Chicago, Illinois, USA, 2001. – P. 148–153. – doi: 10.1109/IAS.2001.955405.
53. *Jančovič M., Žalman M., Jovankovič J.* Parameter identification of induction motors by using genetic algorithms // Virtual University VU'07: 8th International Conference, 13–14 december 2007. – Bratislava, Slovak Republic: STU, 2007. – P. 196–203. – ISBN 978-80-89316-09-0 (in English)
54. *Simon L., Monzon J.M.* The finite element method for parametric identification of a three-phase induction machine with genetic algorithms // 11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (11 CHLIE), Saragossa University (Spain), 1–4 July, 2009. – Saragossa, 2009. – P. 137–143.
55. Parameter identification of induction motors using variable-weight cost function of genetic algorithms / A.C. Megherbi, H. Megherbi, K. Benmahamed, A.G. Aissaoui, A. Tahour // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 5, N 4. – P. 597–605.
56. *Simoes M.G., Bose B.K.* Application of fuzzy neural networks in the estimation of distorted waveforms // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 17–20 June 1996. – Warsaw, 1996. – Vol. 1. – P. 415–420. – doi: 10.1109/ISIE.1996.548524.
57. *Simoes M.G., Bose B.K.* Applications of fuzzy logic in the estimation of power electronic waveforms // Conference Record of the IEEE Conference of Industry Applications Society Annual Meeting, 2–8 October 1993. – Toronto, Ontario, 1993. – Vol. 2. – P. 853–861. – doi: 10.1109/IAS.1993.298999.
58. *Simoes M.G., Bose B.K., Spiegel R.J.* Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1997. – Vol. 12, iss. 1. – P. 87–95. – doi: 10.1109/63.554173.
59. *Zhao J., Bose B.K.* Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02, 5–8 November 2002. – Sevilla, Spain, 2002. – Vol. 1. – P. 229–234. – doi: 10.1109/IECON.2002.1187512.
60. *Sousa G.C.D., Bose B.K.* Fuzzy logic applications to power electronics and drives—an overview // Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 6–10 November 1995. – Orlando, Florida, 1995. – Vol. 1. – P. 57–62. – doi: 10.1109/IECON.1995.483333.
61. *Cincirone M., Pucci M., Cincirone G., Capolino G.A.* A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the parameter of the induction motor // IEEE Transaction on Industrial Applications. – 2003. – Vol. 39, iss. 5. – P. 1247–1255. – doi: 10.1109/TIA.2003.816565.
62. *Koubaa Y.* Recursive identification of induction motor parameters // Simulation Modeling Practice and Theory. – 2004. – Vol. 12, iss. 5. – P. 363–381. – doi: 10.1016/j.simpat.2004.04.003.
63. *Bolovin E., Glazyrin A., Polishchuk V.* Induction motor drive parameters identification applying difference schemes // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 65–68. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.65.
64. *Сергеев И.В.* Экономика предприятия: учебное пособие для экономических специальностей вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 304 с.
65. *Юрьев В.Н.* Оценка качества и конкурентоспособности программных продуктов // Прикладная информатика. – 2013. – № 5 (47). – С. 104–111.

Боловин Евгений Владимирович, аспирант кафедры «Электропривод и электрооборудование» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, идентификация параметров. E-mail: djon-raptor@mail.ru

Critical expert analysis of the induction motor parameters identification methods*

Ev.V. BOLOVIN

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634034, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: djon-raptor@mail.ru

Nowadays the development of an electric induction motor control system is the one of the most prospective trends in electrical engineering and technology. An efficient control system is based on obtaining correct data from sensors and the known values of the motor electromagnetic and electro-mechanical parameters. However, the values of induction motor parameters depend on a thermal state and an operation mode. Consequently, it is necessary to determine the current values of motor parameters directly during the drive operation, which is possible by means of dynamic identification parameters and state variables of the motor. The aim of this work is choosing the best method of induction motors parameter identification based on the critical expert analysis. The author presents a comparative analysis of the induction motor parameter identification methods available in Russian and foreign literature. The author reviews each identification method in detail and describes strengths and weaknesses of each method. However, a comparative analysis based on the description of each method is impossible because of incomplete and subjective representation methods used. In this regard, critical expert analysis methods for the induction motor parameter identification and the use of these methods to find the best one are presented in this article. Finally, the results of the critical expert analysis are shown in tabular form, which helps to find the best identification method. The author considers and presents the main problem relating to the implementation of this method, as part of the identification procedure. The solution of these problems is necessary to improve the identification method in particular and the identification procedure as a whole.

Keywords: Induction drive, parameters identification, analysis of frequency characteristics, catalog data, measurement of active and reactive power, neural networks, genetic algorithms, fuzzy logic algorithms, algebraic identification methods, critical expert analysis

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-7-27

REFERENCES

1. Kashirskikh V.G. Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh dvigatelei [Dynamic identification of induction motor]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2005. 139 p.
2. Makarov V.G. *Asinkhronnyi elektroprivod elektromekhanicheskikh sistem s optimal'nymi rezhimami raboty po kriteriyu energosberezheniya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Induction electric electromechanical systems with optimal operating modes for power saving criterion. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Kazan', 2011. 40 p.
3. Voronin A.A. *Povyshenie effektivnosti kontaktno-dugogasitel'nykh sistem sil'notochnykh kommutatsionnykh apparatov s udlinyayushcheisya dugoi*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of contact-arc suppression systems with high-current switching devices elongating the arc. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Samara, 2009. 19 p.

* Received 28 August 2014.

4. Shirokov N.G. *Sposob opredeleniya induktivnykh soprotivlenii asinkhronnoi dvukhfaznoi mashiny* [The method for determining the two-phase asynchronous induction of resistance machines]. Copyright certificate USSR, no. 116795, 1958.

5. Rogozin G.G., Pechurkin Yu.I., Pyatlina N.G., Alekseev V.I. *Sposob opredeleniya aktivnykh i induktivnykh soprotivlenii rasseyaniya obmotki rotora asinkhronnogo dvigatelya* [The method for determining active and inductive resistances scattering stator winding induction motor]. Inventor's Certificate USSR, no. 1372259, 1988.

6. Kuzovkov S.I., Shirokov N.G. *Sposob opredeleniya aktivnogo, induktivnogo soprotivlenii i EDS asinkhronnogo dvigatelya po vysshim garmonikam* [The method for determining active, inductive reactance and EMF induction motor for higher harmonics]. Inventor's Certificate USSR, no. 1295347, 1987.

7. Rogozin G.G., Pyatlina N.G., Pechurkin Yu.I., Lapshina N.S., Babii V.V. *Sposob opredeleniya chastotnoi kharakteristiki provodimosti asinkhronnoi mashiny* [The method for determining the frequency response of the conductivity of the asynchronous machine]. Inventor's Certificate USSR, no. 1780062, 1992.

8. Reznik D.V., Rod'kin D.I., Romashikhin Yu.V. [Features of the definition of electromagnetic parameters of induction motors using low-frequency test voltage]. *Trudy mezhdunarodnoi chetyr-nadtsatoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"*, Ekaterinburg, 13–16 marta 2007 g. [Proceeding of the Fourteen International Scientific-Technical Conference "Alternating Current Electrical Drives"], Ekaterinburg, UGTU Publ., March 13–16, 2007, pp. 279–283. (In Russian)

9. Rod'kin D.I. Reshenie odnogo klassa nekorrektnykh elektrotehnicheskikh zadach energeticheskimi metodami [The possibility solutions one class ill-posed electrotechnical problems with energy method]. *Elektromekhanichni i energozberigajuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2013, iss. 1 (21), pp. 69–80. (in Russian)

10. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter Identification scheme for induction motors using output inter-sampling approach. *Asian Power Electronics Journal*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 15–22.

11. Verbovoi A.P., Verbovoi P.F. Puti povysheniya tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei i razvitiya teorii elektricheskikh mashin [Ways to improve the technical and economic indicators and the development of the theory of electrical machines]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnyj instytut» – Vestnik of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, 2001, no. 17, pp. 24–27.

12. Kazovskii E.Ya., Rubisov G.V. *Perekhodnye protsessy v sinkhronnykh mashinakh pri anormal'nykh rezhimakh v energosisteme* [Transients in synchronous machines with disturbances in the power system]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1994. 172 p.

13. Rechberger K., Koefler H. Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine. *15th International Conference on Electrical Machines "ICEM 2002"*, Brugge, Belgium, August 25–28, 2002, pp. 25–28.

14. Larin A., Lamary A. Computer simulation of the transient in AC machines at short-circuits and connections to a network on the basis of the experimental frequency-response characteristics. *9th International Symposium on Short-circuit currents in power systems, SCC'2000*, Cracow, October 11–13, 2000, pp. 39–45.

15. Larin A.M., Lamary A., Larina I.I. Eksperimental'noe opredelenie chastotnykh kharakteristik asinkhronnykh mashin pri razlichnykh urovnyakh nasyshcheniya [Experimental determination of conductivity frequency characteristics in an asynchronous machine at different levels of its magnetic chain saturation]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & Electromechanics*, 2003, no. 4, pp. 52–58.

16. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 528 p.

17. Slodazh M.I. *Rezhimy raboty, releinaya zashchita i avtomatika sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of operation, relay protection and automation synchronous motors]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 216 p.

18. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 890 p.

19. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 360 p.

20. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines. AC Machines]. St. Petersburg, Piter Publ., 2007. 350 p.

21. Usoltsev A.A. *Opređenje parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po spravochnym dannym* [Defining the parameters of the equivalent circuit of an induction motor by reference data]. Available at: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (accessed 19.03.2015).
22. Svit P.P., Semkin B.V. *Opređenje parametrov skhem zameshchenii asinkhronnykh dvigatelei nebol'shoi moshchnosti* [Determination of equivalent circuit parameters of asynchronous motors power the small]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunovsky almanac*, 2004, no. 3, pp. 96–99.
23. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. *Algoritm rascheta parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po katalognym dannym* [Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of the asynchronous engine at the catalog data]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta – Vector of science Togliatti State University*, 2013, no. 1 (23), pp. 108–112.
24. Moshchinskii Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Opređenje parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny po katalognym dannym* [Defining the parameters of the equivalent circuit of an induction machine for catalog data]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1998, no. 4, pp. 38–42.
25. Lee K., Frank S., Sen P.K., Gentile Polese L., Alahmad M., Waters C. Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data. *Proceedings 2012 North American Power Symposium (NAPS)*, Urbana, Illinois, 9–11 Sept. 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/NAPS.2012.6336384
26. Zherve G.K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 408 p.
27. Rogozin G.G. *Opređenje elektromagnitnykh parametrov mashin peremennogo toka. Noveye eksperimental'nyye metody* [Determination of the electromagnetic parameters of AC machines. New experimental methods]. Kyi'v, Tehnika Publ., 1992. 168 p.
28. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1985. 840 p.
29. *GOST 7217–87. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy* [State Standard 7217–87. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1987. 52 p.
30. Chepkunov R.A. *Opređenje parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po pasportnym dannym pri vvode v ekspluatatsiyu asinkhronnogo elektroprivoda* [Determination of the replaced circuit parameters of asynchronous motor by using the passport dates for the exploitation beginning of asynchronous electric drivers]. *Inzhenerni ta osviti tehnologii' v elektro-tehnichnyh i komp'yuternykh sistemah – Engineering and Educational Technologies at Electrical and Computer Systems*, 2013, iss. 4 (4), pp. 56–62.
31. Sidel'nikov B.V., Rogachevskaya G.S. [Adjustment method of experimental determination of parameters of asynchronous motors]. *Sbornik nauchnykh trudov XIV mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika"*, 17–22 sentyabrya 2007 g. [Proceedings of the XIV International scientific and technical conference "Problems automated electric. Theory and practice", September 17–22, 2007]. Dneprodzerzhinsk, DGTU Publ., 2007, pp. 167–168.
32. IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators: IEEE Std. 112–1996. New York, IEEE Power Engineering Society, 1997. 64 p. doi: 10.1109/IEEESTD.1997.82360
33. Babau R., Boldea I. Parameter identification for large induction machines using direct online startup test. *Workshop on Electrical Machines Parameters*, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 26th of May 2001, pp. 47–52.
34. Vinokurov M.R., Moiseenko A.A., Maslovtseva N.Yu. *Povyshenie tochnosti rascheta vrashchayushchego momenta asinkhronnogo dvigatelya s uchedom poverkhnostnogo effekta v sterzhnyakh rotora* [Accuracy increase of calculating induction motor torque based on surface effect in rotor bars]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Don state technical university*, 2011, vol. 11, no. 5 (56), pp. 621–629.
35. Karanayil B., Rahman M.F., Grantham G., Rahman M.A. On-line parameter identification using artificial neural networks for vector controlled induction motor drive. *3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004*, Dhaka, Bangladesh, 28–30 December 2004. pp. 23–26.
36. Bongard M.M. *Problema uznvaniya* [Recognition problem]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 319 p.
37. Pinto J.O.P., Bose B.K., Borges L.E., Kazmierkowski M.P. A neural network based space vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2000, vol. 36, iss. 6, pp. 1628–1636. doi: 10.1109/28.887215

38. Gadoue S.M., Giaorus D., Finch J.W. Low speed operation improvement of MRAS sensorless vector control induction motor drive using neural network flux observers. *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON 2006*, Paris, France, 6–10 November 2006. Piscataway, New Jersey, IEEE, 2006, pp. 1212–1217. doi: 10.1109/IECON.2006.347284
39. Louknianov A.G., Sánchez E.N., Félix R.A. Induction motor VSC control using neural networks. *Proceedings of the 15th Triennial World Congress IFAC'2002*, Barcelona, Spain, 21–26 July 2002, vol. 15, pt. 1, pp. 450–457. doi: 10.3182/20020721-6-ES-1901.01073
40. Yazid K., Ibtouen R., Touhami O., Fadel M. Application of EKF to parameters estimation for speed sensorless and neural network control of an induction motor. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power System*, Lisbon, Portugal, September 22–24 2006, pp. 279–283.
41. Bose B.K. Neural network applications in power electronics and motor drives – an introduction and perspective. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, iss. 1, pp. 14–33. doi: 10.1109/TIE.2006.888683
42. Mondal S., Pinto J.O.F., Bose B.K. A neural network based space vector PWM controller for a three-level voltage-fed inverter induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38, iss. 3, pp. 660–669. doi: 10.1109/TIA.2002.1003415
43. Bose B.K. Artificial neural network applications in power electronics. *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON '01*, Denver, Colorado, USA, November 29–December 2, 2001, vol. 3, pp. 1631–1638. doi: 10.1109/IECON.2001.975533
44. Oh W.S., Bose B.K., Cho K.M., Kim H.J. Self turning controller for induction motor drives. *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, Sevilla, Spain, 5–8 November 2002, vol. 1, pp. 152–156. doi: 10.1109/IECON.2002.11
45. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, IECON '98*, Aachen, Germany, 31 August–4 September 1998, vol. 2, pp. 733–739. doi: 10.1109/IECON.1998.724184
46. Hui L., Ozpineci B., Bose B.K. A soft-switched high frequency non-resonant link integral pulse modulated DC-AC converter for AC motor drive. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, IECON '98*, Aachen, Germany, 31 August–4 September 1998, vol. 2, pp. 726–732. doi: 10.1109/IECON.1998.724183
47. da Silva L.E.B., Bose B.K., Pinto J.O.P. Recurrent-neural-network-based implementation of a programmable cascaded low-pass filter used in stator flux synthesis of vector-controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, iss. 3, pp. 662–665. doi: 10.1109/41.767076
48. Zhao J., Bose B.K. Neural-network-based waveform processing and delayless filtering in power electronics and AC drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, iss. 5, pp. 981–991. doi: 10.1109/TIE.2004.834949
49. Kim M.H., Simoes M.G., Bose B.K. Neural network-based estimation of power electronic waveforms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, vol. 11, iss. 2, pp. 383–389. doi: 10.1109/63.486189
50. Simoes M.G., Bose B.K. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1995, vol. 31, iss. 3, pp. 620–629. doi: 10.1109/28.382124
51. Bose B.K. Intelligent control and estimation in power electronics and drives. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, Milwaukee, Wisconsin, 18–21 May 1997, pp. TA2/2.1–TA2/2.6. doi: 10.1109/IEMDC.1997.604201
52. Chun T.-W., Choi M.-K., Bose B.K. A novel start-up scheme of stator flux oriented vector controlled induction motor drive without torque jerk. *Proceedings of the 36th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications (IAC'01)*, Chicago, Illinois, USA, 30 September 2001–4 October 2001, pp. 148–153. doi: 10.1109/IAS.2001.955405
53. Jančovič M., Žalman M., Jovankovič J. Parameter identification of induction motors by using genetic algorithms. *Virtual University VU'07: 8th International Conference*, December 13–14 2007. Bratislava, Slovak Republic, STU Publ., 2007, pp. 196–203. ISBN 978-80-89316-09-0 (in English).
54. Simon L., Monzon J.M. The finite element method for parametric identification of a three-phase induction machine with genetic algorithms. *11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (11 CHLIE)*, Saragossa University (Spain), 1–4 July, 2009, pp. 137–143.
55. Megherbi A.C., Megherbi H., Benmahamed K., Aissaoui A.G., Tahour A. Parameter identification of induction motors using variable-weight cost function of genetic algorithms. *Journal of*

Electrical Engineering and Technology, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 597–605. doi: 10.5370/JEET.2010.5.4.597

56. Simoes M.G., Bose B.K. Application of fuzzy neural networks in the estimation of distorted waveforms. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Warsaw, 17–20 June 1996, vol. 1, pp. 415–420. doi: 10.1109/ISIE.1996.548524

57. Simoes M.G., Bose B.K. Applications of fuzzy logic in the estimation of power electronic waveforms. *Conference Record of the IEEE Conference of Industry Applications Society Annual Meeting*, Toronto, Ontario, 2–8 October 1993, vol. 2, pp. 853–861. 10.1109/IAS.1993.298999

58. Simoes M.G., Bose B.K., Spiegel R.J. Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, vol. 12, iss. 1, pp. 87–95. doi: 10.1109/63.554173

59. Zhao J., Bose B.K. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive. *28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, Sevilla, Spain, 5–8 November 2002, vol. 1, pp. 229–234. doi: 10.1109/IECON.2002.1187512

60. Sousa G.C.D., Bose B.K. Fuzzy logic applications to power electronics and drives-an overview. *Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Orlando, Florida, 6–10 November 1995, vol. 1, pp. 57–62. doi: 10.1109/IECON.1995.483333

61. Cincirone M., Pucci M., Cincirone G., Capolino G.A. A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the parameter of the induction motor. *IEEE Transaction on Industrial Applications*, 2003, vol. 39, iss. 5, pp. 1247–1255. doi: 10.1109/TIA.2003.816565

62. Koubaa Y. Recursive identification of induction motor parameters. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2004, vol. 12, iss. 5, pp. 363–381. doi: 10.1016/j.simpat.2004.04.003

63. Bolovin E., Glazyrin A., Polishchuk V. Induction motor drive parameters identification applying difference schemes. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 65–68. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.65

64. Sergeev I.V. *Ekonomika predpriyatiya* [Economy of the enterprise]. 2nd edition, revised and additional. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 304 p.

65. Yur'ev V.N. Otsenka kachestva i konkurentosposobnosti programmnykh produktov [Evaluation of software quality and marketability]. *Prikladnaya informatika – Applied informatics*, 2013, pp. 104–111.