

УДК 581. 5. 015

**КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин, Н. А. Руденко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: nikita\_rudenko@mail.ru

Асинхронные двигатели широко применяются в различных областях промышленности. Вследствие различных причин асинхронные двигатели выходят из строя и поступают в ремонт. В результате проведения ремонтных операций происходит изменение электромагнитных параметров асинхронных двигателей, которые необходимы для оценки потерь энергии, рабочих и пусковых характеристик, определения послеремонтного паспорта электрической машины. В настоящее время существует большое количество методов определения параметров асинхронных двигателей. Для существующих методов оценивания параметров асинхронных двигателей были выделены объединяющие признаки, на основании которых проведено разделение методов на отдельные группы. Анализ методов определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей позволил выделить их основные недостатки: сложность реализации, низкая точность, необходимость полной или частичной разборки двигателя, поэтому необходим метод, который позволял бы с требуемой точностью идентифицировать электромагнитные параметры асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** асинхронные двигатели, определение параметров, вытеснение тока.

**КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ****Д. Й. Родькін, Ю. В. Ромашихін, М. А. Руденко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: nikita\_rudenko@mail.ru

Асинхронні двигуни широко застосовуються в різних галузях промисловості. Унаслідок різних причин асинхронні двигуни виходять із ладу й надходять у ремонт. У результаті проведення ремонтних операцій відбувається зміна електромагнітних параметрів асинхронних двигунів, які є необхідними для оцінки втрат енергії, робочих і пускових характеристик, визначення післяремонтного паспорта електричної машини. У даний час існує велика кількість методів визначення параметрів асинхронних двигунів. Для існуючих методів їх оцінювання були виділені об'єднуючі ознаки, на підставі яких проведено розподіл методів на окремі групи. Аналіз методів визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів дозволив виділити їх основні недоліки: складність реалізації, низьку точність, необхідність повного або часткового розбирання двигунів, тому потрібен метод, який дозволяв би з необхідною точністю ідентифікувати електромагнітні параметри асинхронних двигунів.

**Ключові слова:** асинхронні двигуни, визначення параметрів, витіснення струму.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В современном мире асинхронные двигатели (АД) широко применяются в различных областях промышленности. Но из-за длительной эксплуатации, работы при несимметрии питающего напряжения, неисправности систем охлаждения, многократных пусков, нарушений правил технической эксплуатации и т.д. АД выходят из строя и проходят ремонт для восстановления работоспособности. Однако следует отметить, что после проведения ремонта параметры и, в частности, электромагнитные параметры (ЭМП) АД могут отличаться от первоначальных, установленных заводом-изготовителем.

Электромагнитные параметры АД необходимы для оценки потерь энергии, расчета рабочих и пусковых характеристик, определения послеремонтного паспорта электрической машины. Однако послеремонтные испытания (определение прочности изоляции, состояния лобовых частей обмотки и т.п.) не дают полной информации об изменении ЭМП, поэтому в настоящее время существует большое количество методов оценивания параметров АД [1, 2], обладающих своими преимуществами и недостатками.

Все методы оценивания параметров АД можно разделить на две группы:

- методы, предназначенные для расчета параметров АД без проведения экспериментальных исследований;
- методы идентификации параметров АД, базирующиеся на использовании экспериментальных данных, измеренных с помощью соответствующей аппаратуры.

Таким образом, возникает необходимость классификации существующих методов для оценивания параметров АД с точки зрения расчетных или экспериментальных данных, которые базируются на соответствующих характерных признаках.

Целью работы является анализ существующих методов определения ЭМП АД.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В отечественной и зарубежной технической литературе [3–21] освещены различные методы определения параметров электрических машин переменного тока.

Для всех существующих методов определения ЭМП АД можно выделить отличительные признаки для формирования карты экспертных оценок методов [22–24].

*Признак П1. Режим работы асинхронного двигателя.* При определении параметров АД можно выделить следующие основные режимы работы:

- П1.1 режим холостого хода;
- П1.2 режим короткого замыкания;
- П1.3 режим работы под нагрузкой.

Причем в рассматриваемом признаке можно выделить еще два режима, которые характеризуют состояние электрической машины:

- П1.4 установившийся режим работы;
- П1.5 переходной режим работы.

*Признак П2. Входное воздействие.* Согласно основной структурной связи «вход–выход», АД можно представить как динамическую систему, для которой могут использоваться следующие характеристики входных воздействий:

- П2.1 гармоническое воздействие;
- П2.2 ступенчатое воздействие;
- П2.3 временной сигнал произвольной формы;
- П2.4 импульсный сигнал;
- П2.5 постоянное воздействие;
- П2.6 механическое воздействие со стороны вала.

*Признак П3. Место приложения входного воздействия.* Такой признак, как входное воздействие, целесообразно различать не только по форме сигнала, но и по месту его приложения. Любой двигатель переменного тока имеет два электромагнитных входа (обмотки статора и ротора) и один механический (вал):

- П3.1 статор;
- П3.2 ротор;
- П3.3 вал.

*Признак П4. Вид питающего напряжения.* В зависимости от используемого источника питания, отличаются и требования к задействованному оборудованию и алгоритмам работы метода идентификации параметров двигателя. Выделяют следующие типы питания двигателя:

- П4.1 источник питания с постоянным напряжением;
- П4.2 источник питания с переменным напряжением;
- П4.3 источник питания с модулированным напряжением.

*Признак П5. Тип используемого оборудования.* Реализация любого метода идентификации ЭМП АД невозможна без использования дополнительного оборудования, с помощью которого измеряются или фиксируются требуемые параметры:

- П5.1 датчики тока;
- П5.2 датчики напряжения;
- П5.3 датчик угловой скорости;
- П5.4 датчик мощности;
- П5.5 датчик измерения величины магнитного поля в зазоре;
- П5.6 средства для измерения геометрических размеров АД.

*Признак П6. Необходимость разборки АД.* Большое количество методов основано на знании

геометрических размеров двигателя, которые невозможно получить без его разборки:

- П6.1 необходима полная разборка АД;
- П6.2 необходима частичная разборка АД;
- П6.3 необходимость в полной или частичной разборке АД отсутствует.

*Признак П7. Вид АД в зависимости от степени износа.* Следует различать методы идентификации параметров АД для новых машин или тех, которые прошли ремонт:

- П7.1 метод применяется для проектируемых АД;
- П7.2 метод применяется для новых АД;
- П7.3 метод применяется для АД, которые находятся долгое время в эксплуатации;
- П7.4 метод применяется для АД, прошедших ремонт.

*Признак П8. Вид выходного сигнала.* При рассмотрении методов идентификации параметров АД могут использоваться различные выходные сигналы. Выходной сигнал наблюдается в виде изменения одного режимного параметра (по месту приложения электромагнитного воздействия) или нескольких – в каждом из магнитно-связанных контуров машины. В случае представления АД в виде сложной системы выходные сигналы при соответствующих входных воздействиях имеют следующий вид:

- П8.1 переходная характеристика;
- П8.2 гармонический сигнал;
- П8.3 импульсный сигнал;
- П8.4 вибросигнал;
- П8.5 угловая скорость.

*Признак П9. Начальные условия или приближения.* Большинство методов идентификации параметров АД требуют наличия определенных начальных условий, таких как диапазон изменения ЭМП АД, паспортные данные и т.д.:

- П9.1 паспортные данные АД;
- П9.2 величина активного сопротивления статора постоянному току;
- П9.3 геометрические размеры АД.

*Признак П10. Полнота определяемых электромагнитных параметров.* Большинство методов идентификации позволяет определить не все, а только часть параметров АД:

- П10.1 все электромагнитные параметры АД;
- П10.2 активные сопротивления статора и ротора;
- П10.3 индуктивные сопротивления статора и ротора;
- П10.4 параметры контура намагничивания;
- П10.5 проводимости цепей АД;
- П10.6 частотные характеристики;
- П10.7 паспортные данные АД.

*Признак П11. Возможность учета имеющихся в АД дефектов и неисправностей.* Важным признаком является возможность учета и идентификации возможных неисправностей АД:

- П11.1 при идентификации ЭМП АД идентифицируются имеющиеся дефекты и неисправности АД;
- П11.2 идентификация дефектов и неисправностей не проводится.

*Признак П12. Оценка влияния на определяемые параметры физических явлений АД и их идентификация.* В процессе идентификации ЭМП АД необходимо учитывать физические явления, которые протекают в двигателе. К таким физическим явлениям относятся потери в стали, нелинейность кривой намагничивания, эффект насыщения стали, поверхностный эффект, эффект вытеснения тока и т.д. Указанные физические процессы можно учесть в виде нелинейностей в математических моделях или схемах замещения АД. В соответствии со сказанным выше, в процессе идентификации ЭМП АД необходимо учитывать такие физические явления, как

- П12.1 потери в стали;
- П12.2 нелинейность кривой намагничивания;
- П12.3 эффект насыщения стали;
- П12.4 поверхностный эффект;
- П12.5 эффект вытеснения тока.

*Признак П13. Автоматизация метода идентификации ЭМП АД.* В современных методах испытаний важным аспектом является не только возможность идентификации ЭМП АД с необходимой точностью, но и возможность автоматизации указанных методов. Этот признак является одним из условий универсальности метода. В соответствии с этим можно выделить следующие признаки:

П13.1 неавтоматизированный – метод требует значительных материально-технических и временных затрат;

П13.2 автоматизированный – требуется выполнить подключение необходимых датчиков, а дальнейшая процедура будет проходить без участия оператора;

П13.3 автоматический – оборудование стационарно установлено с идентифицируемым двигателем и определение его параметров выполняется с заданной периодичностью.

*Признак П14. Стоимость и затраты времени на проведение процедуры идентификации ЭМП АД.*

Стоимость реализации метода идентификации может быть оценена в сравнении с затратами от простоя технологического оборудования. В соответствии с этим можно выделить следующие признаки:

П14.1 высокая стоимость и значительные затраты времени;

П14.2 высокая стоимость и незначительные затраты времени;

П14.3 низкая стоимость и значительные затраты времени;

П14.4 низкая стоимость и незначительные затраты времени.

Полученные выше признаки позволяют для каждого из существующих методов составить карту экспертной оценки, на основании которой можно судить о пригодности метода в той или иной сфере использования. Это позволяет разделить существующие методы идентификации ЭМП АД на отдельные группы, которые более подробно будут рассмотрены ниже.

Рассмотрим каждую группу методов в отдельности более детально. Вначале следует выделить методы, в которых оценивание параметров АД выполняют на основании расчетных зависимостей.

1. *Методы, основанные на анализе картины электромагнитного поля* [3–5].

Реализация методов с использованием картины поля невозможна без моделирования распределения вихревых токов в роторе АД.

Определение расчетных значений сопротивлений получают по результатам решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля. Построение модели АД требует наличия информации о материале и геометрических размерах проводника в пазу ротора, а также предлагается использовать расчет распределения и плотности тока и магнитного потока в роторе.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Признаки методов

<i>Методы, основанные на анализе картины электромагнитного поля</i>					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.5	П6	П6.2	П11	П11.2
П2	П2.1	П7	П7.2	П12	П12.4
П3	П3.1	П8	П8.1	П13	П13.1
П4	П4.2	П9	П9.1, П9.3	П14	П14.1
П5	П5.1, П5.2, П5.5	П10	П10.2		

2. *Методы, основанные на использовании математических моделей* [6–8].

Реализация методов происходит путем подбора параметров, полученных с помощью математического моделирования и в результате экспериментов.

Использование указанной группы методов позволяет при оценивании параметров учитывать эффект вытеснения тока в роторе через геометрические размеры пазов ротора и глубину проникновения тока.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Признаки методов

<i>Методы, основанные на использовании математических моделей</i>					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.1, П1.3	П6	П6.2	П11	П11.1
П2	П2.2	П7	П7.2	П12	П12.3– 12.5
П3	П3.1	П8	П8.1	П13	П13.2
П4	П4.2	П9	П9.1, П9.3	П14	П14.3
П5	П5.1–5.3	П10	П10.2, П10.3		

3. *Методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей* [9–10].

В настоящее время получили распространение методы оценивания ЭМП АД, основанные на построении и применении искусственных нейронных сетей (ИНС). Эти методы нашли свое применение для новых АД. Суть метода заключается в построении ИНС на основании уравнений, описывающих переходные процессы потокосцеплений, токов и скорости АД.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Признаки методов

<i>Методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей</i>					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.1	П6	П6.2	П11	П11.2
П2	П2.1	П7	П7.2	П12	П12.1
П3	П3.1	П8	П8.1	П13	П13.2
П4	П4.2	П9	П9.1, П9.3	П14	П14.1
П5	П5.1–5.4	П10	П10.7		

Как было отмечено выше, существуют методы, основанные на использовании экспериментальных данных и применяемые для идентификации электромагнитных параметров АД.

В [1, 2] рассмотрены основные методы идентификации ЭМП АД:

- методы идентификации ЭМП из опытов холостого хода и короткого замыкания;
- методы идентификации ЭМП по каталожным данным;
- методы идентификации ЭМП по переходным характеристикам;
- методы идентификации ЭМП при питании АД полигармоническим напряжением;
- методы идентификации ЭМП при разночастотном питании АД;
- методы идентификации ЭМП, основанные на совпадении модельных и экспериментальных кривых тока и скорости АД;
- методы идентификации ЭМП из опыта затухания тока;
- методы идентификации ЭМП при работе АД под нагрузкой;
- метод идентификации индуктивного сопротивления рассеяния статора при удаленном роторе;
- методы идентификации параметров по результатам обработки частотных характеристик (зависимостей проводимостей от скольжения);
- методы уточнения ЭМП АД.

На основании указанных методов выбраны наиболее распространенные и с использованием теории экспертных оценок выделены их основные признаки.

4. *Методы, основанные на использовании расчетных схем замещения* [11–14].

Использование расчетных схем замещения позволяет идентифицировать физические явления и

процессы в АД в виде дополнительных нелинейностей или контуров.

Одним из методов, математический аппарат которого основывается на использовании схем замещения, является энергетический метод [11–12], основанный на использовании уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности. Уравнения баланса составляются для каждой из гармоник мгновенной мощности, которые получаются путем перемножения гармоник напряжения и тока. Уравнения баланса определяют равенство мгновенной мощности источника питания и суммы мгновенных мощностей всех потребителей, в качестве которых выступает каждый из параметров схемы замещения, т.е. потребителями являются активные сопротивления и индуктивности соответствующих цепей схемы замещения.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Признаки методов

<i>Методы, основанные на использовании расчетных схем замещения</i>					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.2	П6	П6.3	П11	П11.1
П2	П2.1	П7	П7.3, П7.4	П12	П12.5
П3	П3.1	П8	П8.2	П13	П13.2
П4	П4.2	П9	П9.2	П14	П14.4
П5	П5.1, П5.2	П10	П10.1		

5. *Методы, основанные на опытах холостого хода и короткого замыкания* [15, 16].

Реализация методов идентификации требует проведения опытов холостого хода и короткого замыкания. В качестве начальных условий при решении системы нелинейных уравнений для нахождения параметров АД используются сигналы с датчиков тока и напряжения, значения активной и реактивной мощностей, угловой скорости, а также паспортные данные электрической машины. Учет физических явлений в указанной группе методов проводится по известным уравнениям глубины проникновения тока и относительной высоты проводника.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Признаки методов

<i>Методы, основанные на опытах холостого хода и короткого замыкания</i>					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.1, П1.2	П6	П6.3	П11	П11.2
П2	П2.1	П7	П7.3, П7.4	П12	П12.1
П3	П3.1	П8	П8.2	П13	П13.1
П4	П4.2	П9	П9.1	П14	П14.3
П5	П5.1–5.3	П10	П10.7		

6. Методы, основанные на анализе частотных характеристик [17–21].

Среди известных методов идентификации ЭМП АД следует также выделить группу методов, основанных на анализе частотных характеристик (ЧХ), в соответствии с которыми по результатам обработки ЧХ, полученных из опытов короткого замыкания или затухания тока, определяются искомые параметры АД. Частотная характеристика машины представляет собой зависимость комплексной проводимости со стороны статора от скольжения ротора.

Признаки, характерные для указанной группы методов, приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Признаки методов

Методы, основанные на анализе частотных характеристик					
Признак		Признак		Признак	
П1	П1.5	П6	П6.2	П11	П11.2
П2	П2.1, П2.2	П7	П7.3, П7.4	П12	П12.5
П3	П3.1	П8	П8.1	П13	П13.2
П4	П4.1	П9	П9.1, П9.3	П14	П14.3
П5	П5.1–5.3	П10	П10.6		

Следует отметить, что рассмотренные методы идентификации зачастую нуждаются в предварительной информации об отдельных параметрах АД или его технических характеристиках.

Использование для учета эффекта вытеснения тока в роторе зависимостей от таких величин, как глубина проникновения тока, относительная высота проводника, а также частота тока ротора, приводит к рассмотрению процесса вытеснения со стороны влияния вихревых токов в проводнике и вызванного ими поверхностного эффекта. В свою очередь, такие параметры, как глубина проникновения тока и относительная высота проводника, зависят от геометрических размеров стержней ротора, а, следовательно, нуждаются в разборе исследуемого двигателя и не являются целесообразными для расчета АД при условии ненарушения целостности его структуры.

Следует также учитывать, что поверхностный эффект, с помощью которого в некоторых методах идентификации ЭМП АД [3–5, 7, 8, 11] учитывается вытеснение тока, проявляется в массивном или цельном проводнике и становится заметным при достаточно высоких частотах. Кроме того, магнитопроводы всех машин переменного тока собирают из изолированных друг от друга лаком или поверхностной непроводящей пленкой проводников. При таком делении сечения магнитопровода вихревые токи существенно ослабляются, т.к. уменьшаются магнитные потоки, которыми сцепляются контуры вихревых токов, а, следовательно, понижаются и индуцируемые этими потоками ЭДС, создающие вихревые токи. Поэтому методы, использующие

влияние вихревых токов для учета эффекта вытеснения, являются точными и адекватными применительно к АД с цельным массивным ротором. Относительно же АД с короткозамкнутым ротором, где пусковой момент создается физическими процессами, протекающими в стержнях ротора, а не во всем теле ротора, следует подходить к учету вытеснения тока не с точки зрения влияния вихревых токов, а рассматривать иные физические зависимости в электрической машине.

Многие из рассмотренных выше методов нашли своё применение лишь в отдельных случаях идентификации ЭМП АД, т.к. предусматривают частичную или полную разборку двигателя, дополнительное оборудование для нагружения машины, большую длительность процесса идентификации, использование большого количества датчиков, необходимость предварительной настройки состояния объекта и т.д.

Вследствие этого возникает необходимость развития одного из существующих методов идентификации ЭМП АД с устранением указанных ранее недостатков, который может быть задействован применительно к электрическим машинам в промышленности, агрокомплексе, транспорте, жилищно-коммунальном хозяйстве. Такой метод должен быть доступным в реализации и обеспечивать необходимую точность результатов при невысоких вычислительных ресурсах, при этом основываться на системах уравнений, которые описывают энергопроцессы в АД. Данные процессы могут быть описаны в виде нелинейностей в схемах замещения двигателя. В качестве указанного метода может выступать энергетический метод, который показал результаты, отвечающие требованиям испытательного процесса, и который может быть развит за счет представления АД в виде набора нелинейностей в параметрах схемы замещения.

**ВЫВОДЫ.** 1. В результате проведенного анализа методов определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей были выделены их признаки, на основании которых произведено разделение методов на отдельные группы, что позволило выделить особенности их применения, преимущества и недостатки.

2. Целесообразный метод идентификации ЭМП АД должен отвечать таким требованиям, как высокая точность идентификации, быстродействие, нет необходимости вывода двигателя из эксплуатации, возможность определения всех ЭМП одновременно, простота системы идентификации, универсальность системы идентификации, возможность идентификации ЭМП АД с учетом их изменения во времени, использование малого количества устройств сбора информации.

3. Сравнение существующих методов и их анализ показал, что энергетический метод отвечает требованиям испытательного процесса и может быть развит в вопросах идентификации ЭМП АД с учетом их нелинейностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинов А.П. Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей // 36. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 15. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – С. 110–119.
2. Ромашихин Ю.В. Классификация и эффективность методов определения электромагнитных параметров машин переменного тока // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КДУ, 2008. – Вип. 4/2008 (4). – С. 26–30.
3. Livadaru L., Simion A., Munteanu A. et al. Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis // *Advances in Electrical and Computer Engineering*. – 2013. – PP. 55–58.
4. Gyftakis K.N., Athanasopoulos D., Kappatou J. Study of double cage induction motors with different rotor bar materials. *Electrical Machines (ICEM), 2012, XXth International Conference*. – PP. 1450–1456.
5. Blagoja Arapinoski, Mirka-popnikolova Radevska, Milan Cundev, Vesna Ceselkoska. Modeling of Three Dimensional Magnetic Field in Three-Phase Induction Motor with Double Squirrel Cage. – *International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering (ECAE 2013)*. – PP. 85–89.
6. Model reference adaptive control (MRAC). Drexel University [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html>.
7. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Способы реализации тепловой защиты асинхронных электродвигателей, основанной на измерении входных сопротивлений // 36. наук. праць ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”. – Донецьк, 2008. – Вип. 8 (140). – С. 13–18.
8. Popena A. Model-simulation investigations of induction motor with the consideration of skin effect in rotor bars. – *Przełąd elektrotechniczny // ISSN 0033–2097*. – R. 88 NR 12b/2012. – PP. 29–31.
9. Михайлов А.С., Староверов Б.А. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей для идентификации и диагностики технических объектов // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2013. – Вип. 3. – С. 64–68.
10. 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, 28–30 December 2004*. – Dhaka, Bangladesh, 2004. – PP. 23–26.
11. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В., Черный А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. – 164 с.
12. Родькин Д.И. О балансе мощности в задачах диагностики электромеханических систем // *Проблемы автоматизированного электропривода. Вестник ХПИ*. – Харьков, 2004. – Вып. 43. – С. 166–169.
13. Mihai V.C., Aurel C., Elek D. Optimized design of the induction motor squirrel cage considering the dynamic torque requirements // *Conference: IMACS, 6, Lisboa, PRT*. – Iss. 7/1999 (3). – PP. 207–210.
14. Benecke M., Doebbelin R., Griepentrog G., Lindemann A. Skin effect in squirrel cage rotor bars and its consideration in simulation of non-steady-state operation of induction machines. *Piers online*. – Iss. 7/2011 (5). – PP. 421–425.
15. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
16. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – ГОСТ 7287-87. – М.: Госкомстандарт, 1987. – 52 с.
17. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: монография. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. – 139 с.
18. 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", August 25–28, 2002*. – Brugge, Belgium, 2002. – PP. 25–28.
19. 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.
20. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter identification scheme for induction motors using output inter-sampling approach // *Asian Power Electronics Journal*. – Iss. 2/2008 (1). – PP. 15–22.
21. 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. – PP. 39–45.
22. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
23. Добров Г.М., Ершов Ю.В., Левин Е.И., Смирнов Л.П. Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании. – К.: Наукова думка, 1974. – 263 с.
24. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 487 с.

## CLASSIFICATION OF THE METHODS FOR ESTIMATING THE INDUCTION MOTORS PARAMETERS

**D. Rodkin, Yu. Romashykhin, N. Rudenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: nikita\_rudenko@mail.ru

Induction motors are widely used in various industries. However, due to various reasons induction motors fail and come in for repair. As a result, the repair operation changes the electromagnetic parameters of induction motors, which are needed to assess the energy losses of workers and starting characteristics, determining after repair passports electric machine. It should be noted that currently there are many methods for determining the parameters of induction motors. For existing methods of estimating the parameters of induction motors they isolated uniting signs on the basis of which separation of the methods on selected groups was divided. The analysis methods for determining the electromagnetic parameters of induction motors allowed to identify their main disadvantages: the complexity of implementation, low accuracy, the need for full or partial dismantling of the engine. Therefore, a method that would enable to identify with precision the desired electromagnetic parameters of an induction motor.

**Key words:** induction motors, the definition of the parameters, the displacement current.

## REFERENCES

1. Kalinov, A.P. (2004), "Analysis methods for the identification of the electromagnetic parameters of synchronous motors", *Tehnika v silskomu vyrobnytstvi*, Vol. 15, pp. 110–119. (in Russian)
2. Romashykhin, Yu.V. (2008), "Classification and effectiveness of methods for determining electromagnetic parameters of AC machines", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, Vol. 3, no. 4, pp. 26–30. (in Russian)
3. Livadaru, L., Simion, A., Munteanu, A. et al. (2013), "Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, pp. 55–58.
4. Gyftakis, K.N., Athanasopoulos, D. and Kappatou, J. (2012), "Study of double cage induction motors with different rotor bar materials", *Electrical Machines (ICEM), 2012, XXth International Conference*, pp. 1450–1456.
5. Arapinoski, B., Radevska, M., Cundev, M. and Ceselkoska, V. (2013), Modeling of Three Dimensional Magnetic Field in Three-Phase Induction Motor with Double Squirrel Cage, 2013, International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering (ECAE 2013), pp. 85–89.
6. Model reference adaptive control (MRAC). Drexel University [Electronic resource], Available at: <http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html>.
7. Sivokobylenko, V.F., and Tkachenko, S.N. (2008), "Ways to implement thermal protection of induction motors based on the measurement of input resistances", *Zbirnyk naukovykh prats DVNZ "Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet". Seriya Elektrotehnika i enerhetyka*, Vol. 8, no. 140, pp. 13–18. (in Russian)
8. Popena, A. (2012), "Model-simulation investigations of induction motor with the consideration of skin effect in rotor bars", *Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 12b/2012*, pp. 29–31.
9. Mikhaylov, A.S. and Staroverov, B.A. (2013), "Problems and prospects for the use of artificial neural networks for identification and diagnostic technical objects", *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo ener-*  
*geticheskogo universiteta*, Vol. 3, pp. 64–68. (in Russian)
10. Karanayil, B., Rahman, M.F., Grantham, G. and Rahman, M.A. (2004), "On-line parameter identification using artificial neural networks for vector controlled induction motor drive", *3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004*, 28–30 December 2004, Dhaka, Bangladesh, pp. 23–26.
11. Zagirnyak, M.V., Rodkin, D.I., Romashykhin, Yu.V. and Chornyi, O.P. (2013), *Energeticheskii metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh dvigateley* [Energy method identification of induction motors], ChP. Shcherbatyh A.V., Kremenchug. (in Russian)
12. Rodkin, D.I. (2004), "About the balance of power in the tasks of diagnostics electromechanical systems", *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Vestnik KhPI*, Vol. 43, pp. 166–169. (in Russian)
13. Mihai, V.C., Aurel, C. and Elek, D. (1999), "Optimized design of the induction motor squirrel cage considering the dynamic torque requirements", Conference: IMACS, 6, Lisboa, PRT, Vol. 7, no. 3, pp. 207–210.
14. Benecke, M., Doebbelin, R., Griepentrog, G. and Lindemann, A. (2011), "Skin effect in squirrel cage rotor bars and its consideration in simulation of non-steady-state operation of induction machines", *Piers online*, Vol. 7, no. 5, pp. 421–425.
15. Rogozin, G.G. (1992), *Opredeleniye elektromagnitnykh parametrov mashin peremennogo toka. Novyye eksperimentalnyye metody*, [Determination of electromagnetic parameters of AC machines. New experimental techniques], Tekhnika, Kiev. (in Russian)
16. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy, GOST 7287-87* [Rotating electrical machines. AC Motors. Test methods, GOST 7287-87], Goskomstandart, Moscow. (in Russian)
17. Kashirskikh, V.G. (2005), *Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigateley: monografiya* [Dynamic identification of induction motors: a monograph], Izd-vo KuzGTU, Kemerovo. (in Russian)
18. Rechberger, K. and Koefler, H. (2002), 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.

19. Reznik, D.V., Rodkin, D.I. and Romashikhin, Yu.V. (2007), *Osobennosti opredeleniya elektromagnitnykh parametrov asinkhronnykh dvigateley pri ispolzovanii nizkochastotnogo ispytatelnogo napryazheniya*, *Trudy mezhdunarodnoy chetyrnadtsatoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka»* [Features of the definition of parameters of electromagnetic induction motors by using a low-frequency test voltage fourteenth, Proceedings of the International scientific conference "Electric drives AC"], Izd-vo UGTU Yekaterinburg, March 13–16, 2007, pp. 279–283. (in Russian)

20. Hasegawa, M., Ogawa, D and Matsui, K. (2008), Parameter identification scheme for induction motors using output inter-sampling approach, *Asian Power Electronics Journal*, Vol. 2, no. 1, pp. 15–22.

21. Larin A. and Lamary, A. (2000), "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, pp. 39–45.

22. Beshelev, S.D. and Gurvich, F.G. (1980), *Matematiko-statisticheskiye metody ekspertnykh otsenok* [Mathematical and statistical methods of expert estimates], Statistika, Moscow. (in Russian)

23. Dobrov, G.M., Yershov, Yu.V., Levin, Ye.I. and Smirnov, L.P. (1974), *Ekspertnyye otsenki v nauchno-tehnicheskoy prognozirovaniy* [Expert estimates in scientific and technological forecasting], Naukova dumka, Kiev. (in Russian)

24. Moiseyev, N.N. (1981), *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis], Nauka, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 21.11.2015.