

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Здор И.Е., Мосьпан В.А., Родькин Д.И.
Кременчугский государственный политехнический институт

При испытаниях асинхронных двигателей большое практическое значение имеет определение параметров схемы замещения АД. Параметры двигателей необходимы для определения потерь, настройки систем управления электроприводами в процессе эксплуатации. По ним рассчитываются пусковые, рабочие и механические характеристики электрических машин, их энергетические показатели, определяется работоспособность двигателя в конкретных условиях технологического процесса. Однако простой, надежной методики, позволяющей получить достоверные данные об электрической машине, равно пригодной как в условиях электроремонтных предприятий, так и в условиях эксплуатационной практики, в настоящее время не существует. Сложность задачи диагностики машин переменного тока обусловила появление большого числа технических решений, позволяющих в той или иной мере решить упомянутую задачу, но, как правило, непригодных для широкого практического использования.

Вопрос создания эффективного, легкорезализуемого, достоверного способа определения параметров машин переменного тока все еще открыт.

Прежде чем приступить к созданию нового метода, позволяющего судить о работоспособности машины и обеспечивающего определение технических характеристик АД, необходимо сформулировать приоритетные направления разработок, произвести всесторонний анализ ранее предложенных методик, оценить их преимущества и недостатки. С этой целью представляется необходимой систематизация существующих методов идентификации параметров асинхронных машин. Анализ авторских свидетельств и публикаций в ряде журналов по данной тематике позволяет выделить ряд положений, моментов, по которым можно тем или иным образом охарактеризовать конкретный способ диагностики электрической машины.

Приведенная ниже классификация методов диагностики трехфазных асинхронных машин не претендует на полноту и всесторонность отражения основных моментов рассматриваемых методик, равно как и на уникальность выполненной работы. Незначительный объем литературных источников, подвергшихся анализу, также не позволяет в полной мере судить о положении дел, сложившихся в электроприводе в области диагностики электрических машин.

Классификация выполнена по следующим признакам:

1. По типу питающего напряжения:

- методы идентификации параметров АД, использующие напряжение питания статора следующих видов:
- Трехфазное синусоидальное. Эксперименты с питанием электрической машины от трехфазного источника синусоидального напряжения получили наибольшее распространение. Сюда относятся опыты холостого хода, короткого замыкания, различные нагрузочные режимы работы АД [6, 16, 23, 24, 30], а также ряд других методов [5, 11, 19, 29, 32].
 - Трехфазное несинусоидальное. Примером может служить метод определения переходной проводимости машин переменного тока по частотным характеристикам [10].
 - Однофазное синусоидальное. В качестве примера можно привести опыты несимметричного питания АД (питание однофазным напряжением промышленной частоты двух последовательно включенных обмоток) [15, 34], а также метод, использующий питание от источника однофазного напряжения обмоток асинхронного двигателя, включенных по специальной схеме [17].
 - Напряжение постоянного тока. Метод идентификации параметров по результатам опыта затухания постоянного тока в обмотках неподвижной электрической машины изложен в [3, 22].

При этом во многих методах используется напряжение ниже номинального напряжения питания испытуемого двигателя. Так, питание обмоток статора пониженным напряжением производится в опытах, описанных в [17, 24, 30, 34].

Частота питающего напряжения также может отличаться от промышленной. В частности, это характерно для методов, основанных на математической обработке частотных характеристик машин переменного тока [14, 27].

2. По типу исходной информации:

- Методы, использующие в качестве базовой информации о машине каталожные данные, эмпирические зависимости и конструктивные параметры двигателя [21, 28, 31].
- Методы, в которых исходными являются переходные функции, с последующей аппроксимацией экспериментальных кривых экспоненциальным рядом. В первую очередь, это временные зависимости токов $i_s(t)$ и (или) напряжений $U_s(t)$, снятые в режиме отключения двигателя от источника питания [3, 11, 22,

27, 34] или внезапного трехфазного короткого замыкания [22]. Исходной информацией для определения искомых параметров АД могут служить аппроксимированные кривые, полученные опытным путем для коэффициента дифференциального рассеяния, кривые для учета влияния открытия пазов, а также кривые для коэффициента демпфирования короткозамкнутого ротора [25].

- Методы, в которых используются частотные характеристики. Результатом ряда экспериментальных и расчетных исследований является зависимость параметров электрической машины от частоты, полученная для последовательности дискретных значений аргумента (зависимости напряжений, токов, активных и реактивных входных сопротивлений от скольжения [9, 10, 18, 19, 22, 27] или частоты питающего напряжения [14, 18]). Одним из путей получения частотных характеристик является регистрация комплексов пусковых либо затухающих токов [9, 29].
- Методы, базирующиеся на данных опытов холостого хода, короткого замыкания, работы испытуемого двигателя в нагруженных режимах (значения напряжения и тока статора, угла ϕ между векторами тока и напряжения, потребляемой активной мощности, скорости вращения ротора, значения механических потерь и потерь в стали). В зависимости от конкретного метода сочетание этих параметров может быть различным [6, 15, 16, 17, 24, 30, 32, 34].
- Методы, основанные на использовании статистических данных заводских контрольных испытаний. В качестве примера можно привести метод, представленный в [20].

3. По требуемым в соответствии с методикой значениям параметров схемы замещения АД:

- Методы, для которых в качестве исходных данных достаточно информации, указанной в п.2. Имеется в виду, что для реализации подобных методов нет необходимости предварительно определять часть параметров схемы замещения - значения сопротивлений и индуктивностей обмоток электрической машины [7, 8, 12, 20, 21, 23, 25, 28, 30].
- Методы, для которых кроме данных (п.2.) необходимо наличие значений одного или нескольких параметров схемы замещения. Среди рассмотренных методов встречаются следующие комбинации:
 - активное сопротивление фазы статора r_1 [6, 14, 15, 24, 31];
 - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_1 [34];
 - совокупность r_1 и x_1 [11];
 - r_1, x_1, x_m , где x_m - индуктивное сопротивление ветви намагничивания [9, 13];
 - r_1, x_1, x_m, r_m , где r_m - активное сопротивление намагничивания [29];
 - совокупность r_1 и приведенного активного сопротивления фазы ротора r'_2/s (или r'_2/s) [16, 17];
 - r_1, x_1, x_{ad} [27];
 - r_1, x_c , где x_c - синхронное сопротивление; $x_c = x(js)|_{s=0}$ [19];
 - x_1, x_c [18].

4. По способу получения конечного результата:

- Методы, использующие расчетные соотношения для паспортных данных асинхронного двигателя. В качестве иллюстрации данной группы методов можно привести статью [28], в которой на основании выражений для $I_{1н}, I_{2н}, P_{1н}, M_{кр}$ и т.д. выведены формулы для расчета параметров Т-схемы замещения асинхронного двигателя.
- Методы, использующие формулы для обработки результатов опытов холостого хода и короткого замыкания АД. К этой группе следует отнести как непосредственно опыты холостого хода и короткого замыкания, описанные, например, в [1, 2], так и методику, изложенную в [30].
- Методы определения параметров схемы замещения при построении круговых и разного рода векторных диаграмм. Это и совмещенные диаграммы АД в двигательном режиме и режиме синхронного холостого хода [6], и векторные диаграммы напряжений и токов [16, 23], и диаграммы для определения ортогональных составляющих потокосцеплений статора и ротора [31].
- Методы, достигающие поставленной цели при использовании выражений для электромагнитных полей в зоне электромеханического преобразования энергии и эмпирических зависимостей [7, 8].
- Методы, путем получения результата которых является решение систем уравнений.
 - Наиболее часто встречающиеся пути построения систем уравнений:
 - приведение экспериментальных данных в соответствие аппроксимирующим выражениям [18, 22, 27, 34];
 - равенство полученных экспериментальным путем значений комплексных входных или роторных сопротивлений рассчитанным в соответствии с выбранной схемой замещения выражениям [9, 19, 24, 29];
 - составление алгебраических и дифференциальных систем уравнений на основе баланса напряжений АД и (или) электромагнитного состояния электрической машины [11, 13, 15, 16, 17, 31].

- Методы, обеспечивающие определение искомых параметров по выражениям, выведенным для точек сопряжения отрезков асимптотической ЛАЧХ. В соответствии с методикой [14], экспериментальная зависимость входной проводимости машины от частоты $|z_d(j\omega)|^{-1}$ строится в логарифмическом масштабе и аппроксимируется асимптотической характеристикой. Число и взаимное расположение точек сопряжения отрезков позволяет определить структуру оператора $z_d(p)$ и значения постоянных времени T_i , с помощью которых рассчитываются параметры Т- или Г-образных схем замещения АД.

5. По полноте определения искомых параметров:

- Методы, которые позволяют в итоге получить все параметры выбранной схемы замещения асинхронной машины. Примером этой немногочисленной группы может служить метод, опубликованный в [28]. В соответствии с изложенным в этой статье, здесь определяются все параметры классической Т-образной схемы замещения: активные сопротивления фаз статора и ротора r_1 и r'_2 , индуктивности фаз статора и ротора L_1 и L_2 , максимальная взаимная индуктивность между фазой статора и ротора M .
- Методы, обеспечивающие определение лишь некоторой части параметров схемы замещения, для которой проводились вычисления. Остальные параметры либо должны быть предварительно определены другим способом (эти параметры входят в п.3.), либо попросту не определяются. Для разных методов комбинации определяемых параметров могут быть различны. Так, значительный вес имеют методы, в которых в качестве выходной информации служат значения активных и индуктивных сопротивлений эквивалентной многоконтурной схемы замещения ротора r_{pi} , x_{pi} [9, 10, 11, 13, 18, 27, 29]. Кроме того, имеют место следующие сочетания определяемых параметров:
 - r_{pi} , x_{pi} , x_μ , r_μ [24];
 - r_{pi} , x_{pi} , x_μ , r_1 [34];
 - x_1 , x'_2 [16];
 - x_1 , x'_2 , r'_2 [23];
 - x_1 , x'_2 , x_μ , r'_2/s [6];
 - L_1 , L_2 , L_μ , r'_2 [14, 15, 31];
 - индуктивное сопротивление от высших гармоник поля в воздушном зазоре (дифференциального рассеяния) [25];
 - суммарное реактивное сопротивление лобового рассеяния обмоток статора и ротора [20].

Также следует выделить группу методов, которые имеют своей целью уточнение значений всех параметров схемы замещения двигателя или их части. Примером таких методов могут служить способ определения значения активного сопротивления статора на протяжении всего технологического процесса [33] и способ определения индуктивного сопротивления асинхронных двигателей, в соответствии с которым производится уточнение значения x_k , полученного при обычных нагрузочных испытаниях и в соответствии с СТ СЭВ 168-85, с учетом насыщения магнитной цепи и явления вытеснения тока ротора [32]. Способ, изложенный в [26], также можно отнести к рассматриваемой категории методов. В соответствии с данной методикой производится перерасчет паспортных или полученных каким-либо путем параметров машины переменного тока с учетом несимметрии и несинусоидальности напряжения сети.

Представленная выше классификация методов диагностики трехфазных асинхронных машин наглядно отображена на рис. 1.

Выводы:

Практически ни в одном из анализированных источников не представлен метод, создававшийся в предположении несимметричности конструкции электродвигателя, тогда как на практике преобладают именно несимметричные трехфазные машины переменного тока. Поэтому необходимо больше внимания уделять диагностике асинхронных двигателей с учетом возможной их несимметрии.

Методы определения параметров эквивалентной схемы замещения АД по каталожным данным и расчетным коэффициентам нельзя считать удовлетворительными в плане решения поставленной задачи, поскольку неизбежно отклонение каталожных данных от данных реальной машины. В особенности это относится к двигателям, прошедшим капитальный ремонт. Ощутимую ошибку в результаты расчетов также вносят коэффициенты, полученные на основе эмпирических соотношений, носящие статистический характер и не дающие достоверной информации о состоянии конкретного двигателя.

То же самое можно сказать и о других методах теоретического плана, не опирающихся на результаты экспериментов над диагностируемой машиной.

Применение методов, основой которых является использование номограмм, круговых, векторных диаграмм и т.п., ограничивается точностью графических построений, а также ошибкой, возникающей в связи с этим в последующих расчетах.

Необходимо идти по пути упрощения процедуры испытаний. С этой точки зрения является нерациональной программа испытаний, состоящая из 5 - 6 этапов, каждый из которых требует перенастройки испытательного оборудования, установки для каждого этапа испытаний нового режима работы испытуемой машины.

Также неэффективны и методы, связанные с разборкой испытываемой машины (например, способ вынужденного ротора [5]), использованием специальных измерительных обмоток, укладываемых на статоре или роторе [23], сопряжением диагностируемого двигателя с другими электромеханическими агрегатами (нагрузочными устройствами, датчиками скорости, момента и т.п.). Такие способы требуют специальной подготовки АМ к эксперименту, что усложняет процесс измерений, приводит к значительному увеличению времени, затрачиваемого на подготовительные работы.

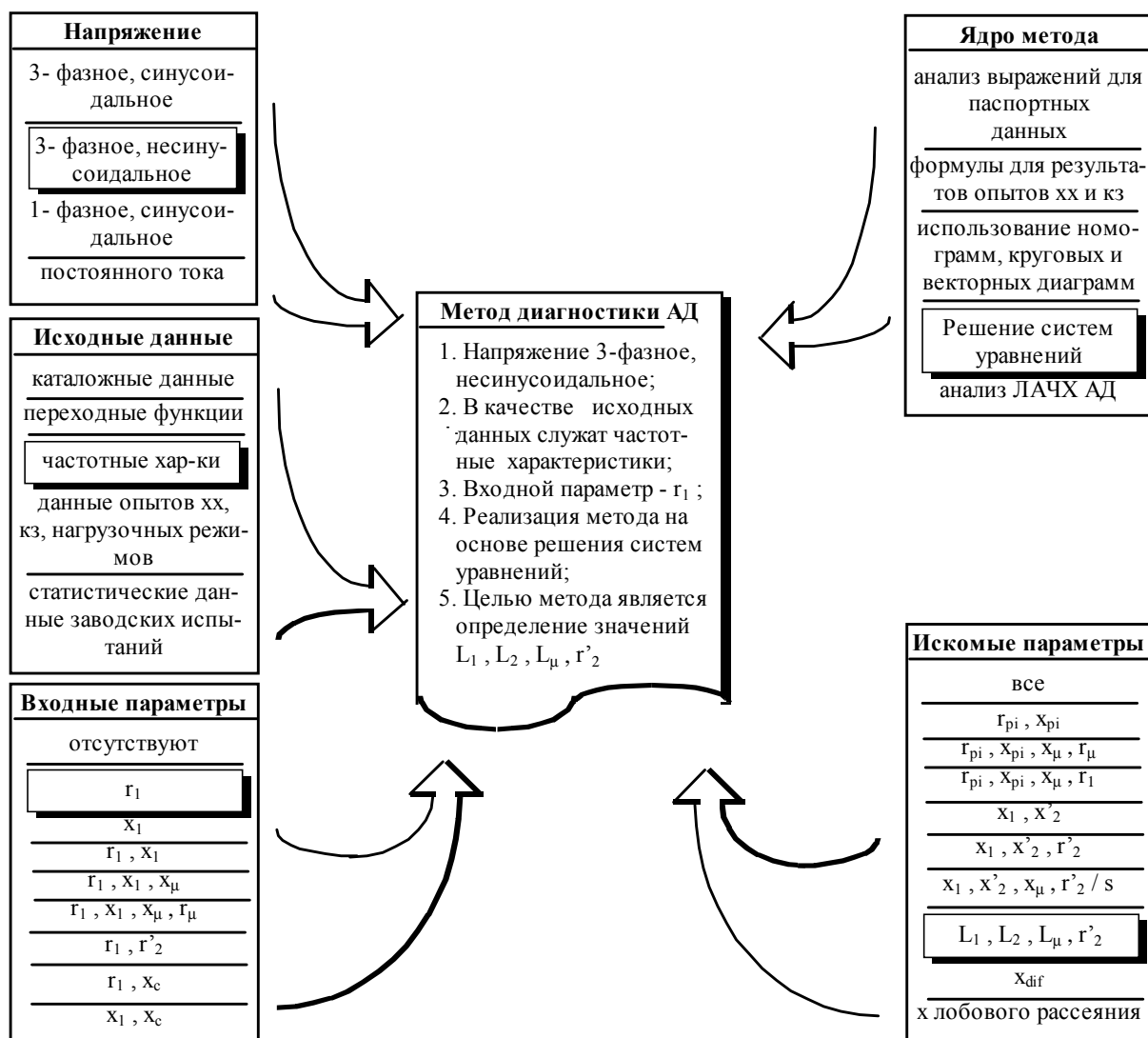


Рис.1. Классификация методов диагностики АД.

При разработке новых методов диагностики следует стремиться к минимизации затрачиваемых усилий по предварительному определению параметров (по п.3) и к возможно более полному набору искомых параметров (п.5).

Одним из приоритетных направлений развития электропривода является автоматизация процесса испытаний, использование ЭВМ не только для математической обработки опытных данных, но и во время проведения эксперимента. В функции ЭВМ должны входить управление ходом испытаний, поддержание требуемого режима работы испытательного комплекса, контроль датчиков, интерпретация полученных данных в соответствии с тем или иным методом диагностики, выдача результатов испытаний и заключения о работоспособности диагностируемой машины.

Является перспективным создание методов, базирующихся на применении систем динамического нагружения, а также использующих неполнофазные режимы работы АД с тиристорными коммутаторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины. Учеб. для электромех. спец. вузов. -М.: Высш. шк., 1988.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. -М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Сидельников А.В. О синтезе схем замещения электрических машин переменного тока по заданным частотным характеристикам. - В кн.: Теория, расчет и исследование высокоиспользуемых электрических машин. Л.: Наука, 1965.
4. Куцевалов В.М. Методика расчета характеристик асинхронной машины с массивным ротором. // Электричество. -1960. -№5. -с.63.
5. Партс Р.Р. О способе вынуженного ротора. // Электричество. -1961. -№6. -с.88.
6. Столов Л.И. К вопросу об определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя малой мощности. // Электричество. -1962. -№5. -с.87.
7. Постников И.М., Счастливый Г.Г. Метод анализа электрических машин с использованием удельных параметров. // Электричество. -1969. -№1. -с.75.
8. Грюнер А.И., Казанский В.М. Эквивалентные электрические параметры и схемы замещения массивного короткозамкнутого ротора. // Электричество. -1973. -№2.
9. Сивокобыленко В.Ф., Совпель В.В. О синтезе схем замещения асинхронной машины по частотным характеристикам. // Электричество. -1975. -№7. -с.33.
10. Микляев М.С., Семиков А.П. Определение параметров и характеристик асинхронных электродвигателей при питании от несинусоидального напряжения. // Электричество. -1977. -№4. -с.78.
11. Rogozin G.G., Pyatlina N.G. Синтез схемы замещения асинхронной машины по данным опыта отключения от сети. // Электричество. -1979. -№4. -с.56.
12. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схемы замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин. // Электричество. -1979. -№10. -с.35.
13. Rogozin G.G., Pyatlina N.G. Способ идентификации асинхронной машины по экспериментальным данным ее динамического режима. // Электричество. -1981.
14. Ильин М.О., Котченко Ф.Ф. Частотный метод определения параметров схем замещения обмоток электрических машин. // Электричество. -1987. -№3. -с.60.
15. Мощинский Ю.А., Осин И.Л. Определение параметров трехфазного асинхронного двигателя из опытов несимметричного питания. // Электричество. -1993. -№1.
16. Попов В.И., Макаров Л.Н. К экспериментальному определению параметров схемы замещения асинхронной машины. // Электричество. -1993. -№7. -с.49.
17. Соколов М.М., Масандилов Л.Б., Грасевич В.Н. Метод экспериментального определения параметров асинхронного двигателя. // Электротехника. -№5. -1973.
18. Лернер Л.Г., Сидельников А.В. Построение схем замещения электрических машин по заданным частотным характеристикам. // Электротехника. -1974. -№11.
19. Лернер Л.Г., Сидельников А.В. Синтез схем замещения для расчета ряда переходных и установившихся процессов синхронных и асинхронных машин. // Электротехника. -1975. -№9. -с.35.
20. Прокофьев Ю.А., Андриенко В.М. Экспериментально- статистический метод определения реактивного сопротивления лобового рассеяния короткозамкнутых асинхронных машин. // Электротехника. -1976. -№11. -с.11.
21. Совпель В.Б., Казанцева Т.А. Расчет параметров асинхронных глубокопазных двигателей. // Электротехника. -1977. -№1. -с.9.
22. Казовский Е.Я., Лернер Л.Г., Сидельников А.В. Синтез схем замещения электрических машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам. // Электротехника. -1979. -№5.
23. Новиков Ю.Д., Гентковски З., Бабин Ю.В. Экспериментальное определение индуктивностей рассеяния асинхронных двигателей. // Электротехника. -1982. -№3.
24. Микляев М.С., Гаинцев Ю.В., Чубарян А.Т., Семиков А.П., Коинов В.С. К определению схем замещения и характеристик асинхронных двигателей по данным заводских испытаний. // Электротехника. -1987. -№5. -с.24.
25. Пашинский В.Г. К расчету сопротивления дифференциального рассеяния в трехфазных асинхронных двигателях. // Электротехника. -1990. -№3. -с.16.
26. Плющ Б.М., Абдулрахманов К.А. Параметры трехфазного асинхронного двигателя при несимметрии и несинусоидальности напряжения сети. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1966. -№1. -с.31.
27. Лысцов А.Я. Экспериментальное определение параметров асинхронной машины с короткозамкнутым ротором. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1967. -№3. -с.22.

28. Сивокобыленко В.Ф., Совпель В.Б., Павлюков В.А.. Определение эквивалентных параметров машин переменного тока по переходным функциям и частотным характеристикам. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1976. - №5.
29. Лысцов А.Я., Лысцова Г.Я. Определение параметров асинхронного двигателя с фазным ротором по каталожным данным. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1977. -№11. -с.124.
30. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Определение параметров и характеристик машин переменного тока из опытов пуска и выбега. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1978. -№5.
31. Беляев В.П., Пардо Гарсия А. К вопросу об определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя. // Изв. ВУЗов. Энергетика. -1990. -№7.
32. А.с. 1415922 (СССР). Способ определения индуктивного сопротивления асинхронных двигателей. / Гаинцев Ю.В., 1986.
33. А.с. 1514093 (СССР). Способ исследования электрических машин переменного тока. / Калашников В.И., Власов В.Д., Власова Г.Н., Калашников С.Н., 1986.
34. А.с. 1372259 (СССР). Способ определения активных и индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки ротора асинхронного двигателя. / Рогозин Г.Г., Печуркин Ю.И., Пятлина Н.Г., Алексеев В.И. Оpubл. в Б. И., 1988, №5.