

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен

Работоспособность асинхронных двигателей (АД) во многом зависит от условий окружающей среды и режимов эксплуатации. Согласно статистике отказов АД, наибольшее число выходов их из строя связано с повреждением изоляции обмотки статора. Аварийная остановка технологического процесса приводит к ущербу, связанному не только с необходимостью ремонта или закупки нового оборудования, но и с недопуском продукции, а значит недополучением прибыли [1]. Таким образом, диагностика и мониторинг состояния изоляции важная и ответственная задача профилактики асинхронного двигателя.

Ключевые слова: диагностика, изоляция, асинхронный двигатель, мониторинг, нечеткая логика.

Эффективные средства и методы оценки состояния изоляции могли бы в значительной степени решить проблему эксплуатационной надежности. Однако, даже имея в распоряжении высококачественные изоляционные и пропиточные материалы, необходимо вести своевременный контроль показателей изоляции во время эксплуатации АД в целях предотвращения преждевременного выхода из его строя из-за нарушения межвитковой или корпусной изоляции [1].

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором обычно рассчитаны на срок службы 15–20 лет без капитального ремонта при условии их правильной эксплуатации. Под правильной эксплуатацией АД понимается его работа в соответствии с номинальными параметрами, указанными в паспортных данных электродвигателя. Однако в реальной жизни имеет место значительное отступление от номинальных режимов эксплуатации. Это в первую очередь связано с плохим качеством питающего напряжения и нарушением правил технической эксплуатации: технологические перегрузки, условия окружающей среды (повышенная влажность, температура), снижение сопротивления изоляции, нарушение охлаждения. Последствием таких отклонений являются аварийные режимы работы АД. В результате аварий ежегодно выходят из строя до 10% применяемых электродвигателей. Например, 60% скважных электронасосных агрегатов выходят из строя чаще одного раза в году. Выход из строя АД приводит к авариям и материальному ущербу, связанному с простоем технологического оборудования, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя электродвигателя [2].

Для оценки состояния изоляции асинхронного электродвигателя существует несколько методов (рисунок 1).

Эксплуатационные дефекты межвитковой изоляции подразделяются на:

- тепловые
- усталостные.

К тепловым относятся изменения:

- спекание
- обугливание

– тепловое старение, являющиеся следствием недопустимого превышения температуры обмотки. Они могут быть обнаружены по спектральному составу тока или другими аналогичными способами, однако, в первую очередь, должны предупреждаться эффективными средствами эксплуатационной диагностики – защиты АД [3].

Для двигателей с большим сроком эксплуатации основное значение имеет диагностика усталостных повреждений межвитковой изоляции. Структурным признаком наступления фазы критического износа и перехода АД в состояние скрытого отказа служит образование сквозных трещин в межвитковой изоляционной композиции. Дефекты несквозного характера (отслоения, экструзия) практически не снижают пробивного напряжения изоляции и не имеют тенденции к быстрому развитию. Двигатель с такими повреждениями может безаварийно работать длительное время, тогда как диагностика способами 3–6, чувствительными к любым неоднородностям изоляции, покажет отрицательное состояние обмотки и необходимость проведения ремонта [3].

Таким образом, основным условием достоверной диагностики следует считать избирательную чувствительность к сквозным по-

вреждениям изоляционного слоя, ответственным за электрический пробой [3].

Этому условию удовлетворяют способы 1, 2, однако способ 1 с зондирующими воздействиями в десятки киловольт небезопасен для изношенной изоляции.

Метод 2 использует относительно безопасную область газового разряда – обратимые частичные разряды, но в классическом варианте применим к высоковольтным машинам, поскольку рабочих напряжений низковольтных

АД недостаточно для образования ЧР в заполненных воздухом полостях изоляции [3].

Изоляция низковольтных АД способна генерировать частичные разряды без приложения опасных повышенных напряжений при условии эксплуатационного увлажнения обмотки. Обратимые ЧР при рабочем или близком к нему напряжении наиболее достоверно характеризуют состояние обмотки как предпробойное и, следовательно, являются наиболее ценным диагностическим признаком [3].

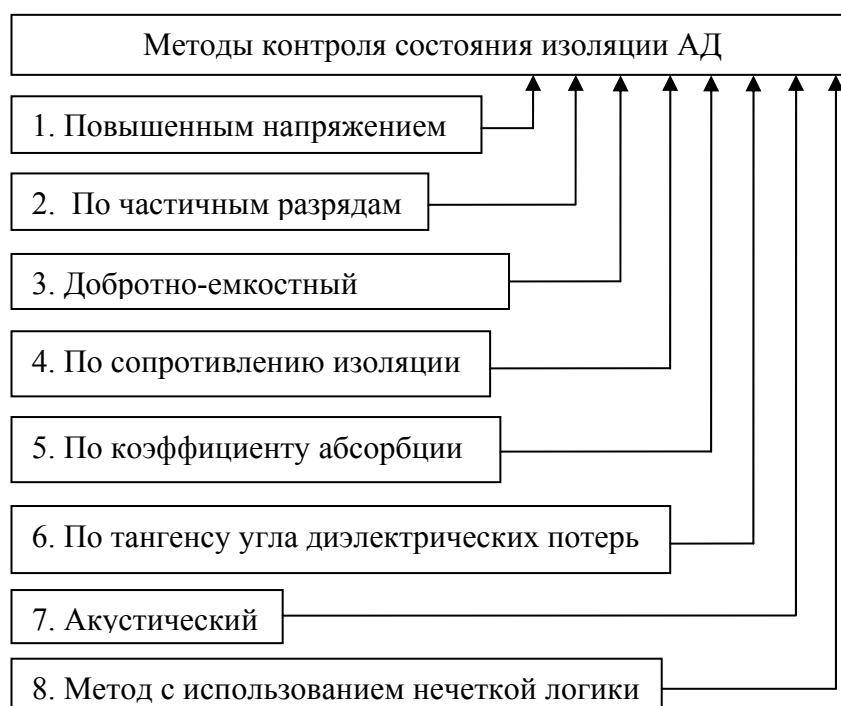


Рисунок 1 – Методы контроля изоляции АД

Электрическое сопротивление изоляции не имеет самостоятельной диагностической ценности, но служит вспомогательным признаком при диагностике по ЧР. Двухпараметрическая диагностика при высокой диагностической ценности основного признака ЧР и относительной простоте измерения сопротивления изоляции удовлетворяет требованиям полноты обследования при минимальных затратах [3].

Одним из направлений, определяющих повышение качества информационных технологий контроля и диагностики технического состояния, следует считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием технологии экспертных систем, которые способны обеспечить повышение качества распознавания

технического состояния объекта, что отражено ниже [9].

Состояние асинхронного электродвигателя характеризуется большим количеством параметров состояния (признаков) x_i , значения которых можно получить, используя штатные средства измерения, или же путем проведения дополнительных испытаний на работающем или отключенном электродвигателе. При большом числе параметров состояния x_i построение нечеткой базы знаний экспертной системы становится трудновыполнимой задачей. Для электрооборудования входные переменные x_i классифицируются на группы, и формируется иерархическая многоуровневая база знаний, состоящая из вложенных друг в друга нечетких баз знаний меньшей размерности [9].

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На рисунке 2 представлена разработанная в работе [9], двухуровневая иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии временно отключенных или проходящих послеремонтные испытания асинхронных двигателей.

Оценка технического состояния электродвигателей проводится с использованием результатов опыта холостого хода, короткого замыкания, испытаний в динамическом режиме, измерений параметров обмоток и изоляции обмоток.

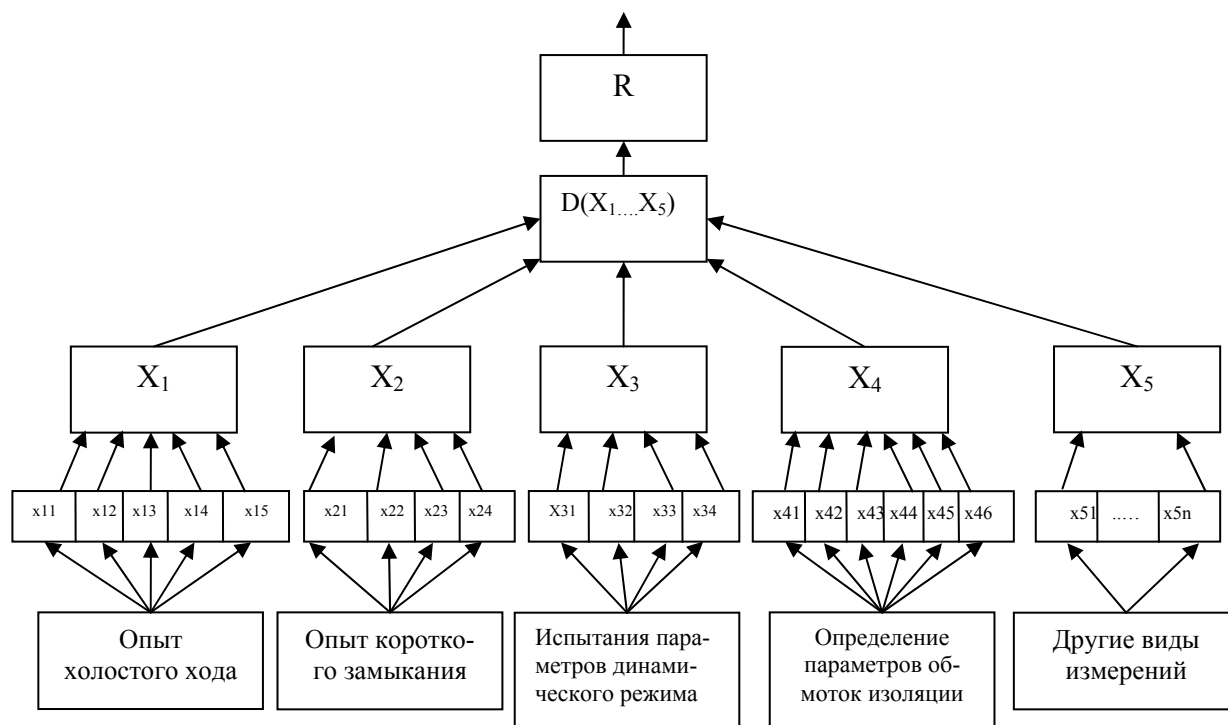


Рисунок 2 – Двухуровневая иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии асинхронных двигателей

Другой подход к определению остаточного ресурса АД учитывает то, что эксплуатационные воздействия на изоляцию электродвигателей определяются воздействием температуры, влаги, вибраций, агрессивных веществ, что соответствует тепловому, влажностному и механическому старению. Для имитации механических воздействий служит установка, включающая в себя вибростенд, пульт управления с контрольно-измерительной аппаратурой и устройства для автоматического поддержания режима работы. Для имитации климатических воздействий используется камера теплоты и влаги [1].

С помощью измерительного комплекса, работающего по методике, описанной в [1] путем испытания АД в камере теплоты и влаги, а также на вибростенде при воздействии на них влажности X_1 (0–100%), температуры X_2 (0–200°C) и виброскорости X_3 (0–420 мм/с) получены данные по затуханию акустических, связанные с модулем упругости E и свидетельствующие о степени старения изоляции.

Так же известно устройство для оценки технического состояния изоляции обмоток АД [4].

Прибор относится к области контрольно-измерительной техники, в частности к устройствам для диагностики изоляции обмоток электродвигателей [4].

Значения диагностических параметров, характеризующих состояние изоляции, зависящих от межвиткового сопротивления, межвитковой емкости, а также от параметров изоляции обмотки относительно корпуса, которые изменяются в отличие от индуктивности и активного сопротивления обмотки в процессе эксплуатации. Ввиду того что индуктивность обмотки, межвитковая емкость и межвитковое сопротивление образуют колебательный контур, то параметры свободных затухающих колебаний, возникающих в обмотке, пропорциональны значениям этих величин [4].

Если на обмотку подать прямоугольный импульс, то в ней возникнет переходный процесс. Для работоспособной изоляции электродвигателя он имеет вид затухающих колебаний [4].

Таким образом, зная значения параметров затухающих колебаний, таких как амплитуды первого и второго полупериодов и величины первого и второго периодов, можно судить о качестве изоляции электродвигателя. В предложенном устройстве для измерения амплитуды колебаний использован пиковый

детектор, а для измерения периода - усилитель-ограничитель и измеритель периода. В качестве отсчетного устройства использован вольтметр, а последовательность вывода результата измерения задана блоком управления [4].

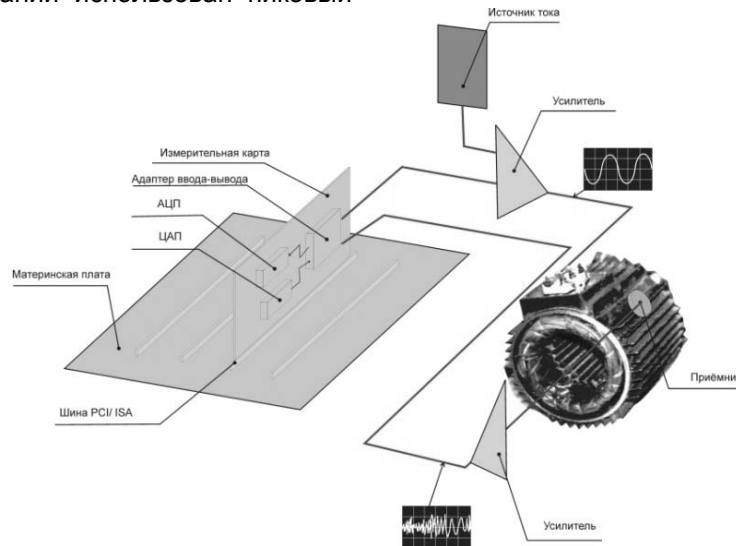


Рисунок 3 – Схема измерительного комплекса

Это устройство позволяет получить диагностический параметр, с помощью которого после математической обработки определяются такие характеристики, как сопротивление и емкость обмотки электрической машины относительно корпуса. В то же время состояние изоляции, в основном, зависит от параметров межвитковой изоляции, таких как межвитковое сопротивление и межвитковая емкость. В связи с этим результаты диагностики с использованием рассмотренного устройства имеют низкую достоверность и точность оценки состояния изоляции [4].

Известен также прибор ПУНС-5 (рисунок 4), предназначенный для диагностики узлов электрических машин (якорь, статор), работающих от сети переменного тока 220 В, 50 Гц [5].

Прибор характеризуется большими значениями напряжений, возбуждаемых в обмотках контролируемого изделия, что приближает режим диагностики к режиму работы контролируемого изделия в реальных условиях и повышает достоверность контроля [5].

Прибор ПУНС-5 обеспечивает следующие функции контроля обмоток электрических машин:

- определение целостности обмоток якоря и измерение величины сопротивления обмоток.

- обнаружение межвиткового замыкания в обмотках якоря.

- определение сопротивления изоляции обмоток якоря (статора) при напряжении 500 В. (заменяет функции мегаомметра М4100/3 на 500 В)

- определение шага и угла укладки обмоток якоря (при помощи адаптера).

- определение целостности обмоток статора и измерение величины сопротивления обмоток .

- обнаружение межвиткового замыкания в обмотках статора (при помощи датчика МВС) [5].

Сопротивление обмоток якоря измеряется с дискретностью 0,01 Ом, что позволяет определять дефекты переходных контактов между выводами обмоток и пластинами коллектора, то есть выявлять скрытые дефекты переходных сопротивлений, которые могут проявиться в работе через некоторое время. Ступенчатая регулировка высоты лапок прибора и свободное перемещение обеих лапок по валу позволяет без длительной перенастройки контролировать якорь вместе с подшипниками и изоляционными шайбами. Обрыв и межвитковое замыкание обмоток статора (при помощи датчика МВС) обнаруживаются по свечению цветных индикаторов на самом датчике, что делает процесс контроля

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

более удобным и достоверным и исключает состояние неопределенности при неточном выполнении инструкции [5].

Прибор ПУНС-5 имеет световую и звуковую сигнализацию при обнаружении обрыва и межвиткового замыкания в обмотках. Проверка статоров производится путем сканирования датчиком МВС (рисунок 5) внутри статора, из которого предварительно вынут якорь (ротор). Определение шага и угла укладки обмоток якоря производится при помощи адаптера (поставляется отдельно), который надевается на коллектор испытуемого якоря [5].

Контроль сопротивления изоляции электрооборудования возможно также проводить с помощью приборов Vigilohm SM 21 фирмы "Schneider Electric", [6].

Известен также прибор ЭРЗЭ-5 Харьковского ООО «Тетра». Недостаток этих приборов заключается в том, что их выходным параметром является дискретный сигнал предупреждения или блокировки включения при достижении порогового значения сопротивления. Потому они служат для защиты электрооборудования и не предназначены для получения информации о текущем состоянии изоляции и об изменениях ее состояния во времени.

Для выполнения задачи мониторинга изоляции на Одесском припортовом заводе (ОПЗ) был разработан и изготовлен прибор контроля изоляции, изображенный на рисунке 6.

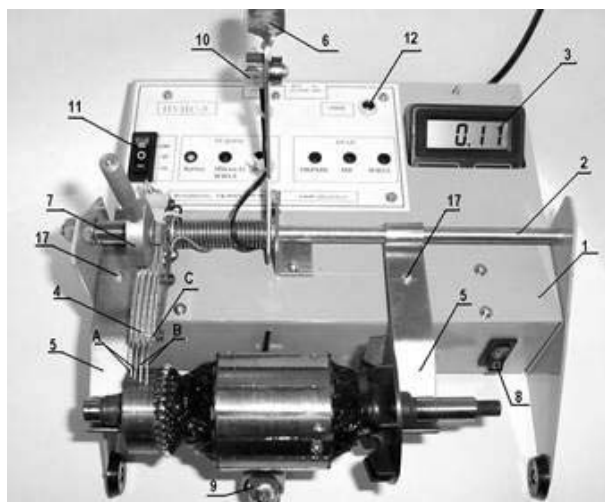


Рисунок 4 – Прибор ПУНС-5 с контролируемым якорем [5]



Рисунок 5 – Датчик МВС для определения межвиткового замыкания в обмотках статора [5]

Первоначально прибор контроля изоляции предназначался для работы с микропроцессорным контроллером "Premium", в составе системы мониторинга электрооборудования фирмы "Schneider Electric" и собран был на базе микросхем малой интеграции с диапазоном измерений $0 \div 20$ МОм, при тестовом напряжении 300 В. Отображение информации на станции оператора производилось с помощью программы "Monitor PRO V-7".

При работе с системой были выявлены следующие недостатки:

- диапазон измерений $0 \div 20$ МОм недостаточен для получения более полной информации о состоянии изоляции обмотки;
- несогласованность в работе прибора контроля изоляции и микропроцессорного контроллера повлекла сбой в передаче информации и затруднила формирование баз данных.

Программа "Monitor PRO V-7" предоставляет возможность видеть текущее состояние пускозащитной аппаратуры и величины рабочих токов. Контроль токов осуществляется с частотой – одно измерение в 2 с, потому невозможно получение информации о переходных процессах при пуске двигателя и при неполадках.

Таким образом, для решения задач записи переходных и быстротекущих процессов, получения информации о действительном состоянии оборудования и оценки остаточного ресурса, эта система оказалась малоприменна [6].

Опираясь на приобретенный опыт, на ОПЗ было разработано и изготовлено качественно новое устройство контроля изоляции (УКИ) на базе микроконтроллера AVR фирмы ATMEL. Применение микроконтроллерной техники позволило пересмотреть возможности всей системы. Необходимость расширения диапазона измерений и придания системе большей гибкости заставила создать новую ИИС мониторинга электродвигателей. Для визуализации и накопления архивов ин-

формации на компьютере, разработана собственная программа «I-визио». Кроме более низкой стоимости, вновь созданная система обладает следующими достоинствами:

- диапазон измерений $R_{из}$ от 0 до 3000 МОм;
- измерения потребляемого двигателем тока производятся с частотой 100 измерений за одну сек. Это дает возможность построения пусковых диаграмм; диаграмм изменения тока, сопровождавшего аварию, или срабатывание защит на данной установке. Также есть возможность построения диаграмм рабочего тока, для оценки величины вибрации рабочего механизма;
- высокая частота опроса дает возможность оперативного вмешательства при на-

ступлении критических или аварийных режимов работы механизма.

– результаты замеров сопротивления изоляции и токов, а также токовые диаграммы, архивируются в базы данных.

Каждое УКИ может тестировать одновременно до восьми позиций электродвигателей и работать самостоятельно. УКИ обладает функциями сигнализации и блокирования возможности пуска аварийного электродвигателя в работу, при достижении величины сопротивления изоляции пороговых значений. Устройство оснащено собственным дисплеем, для отображения результатов замеров [6].

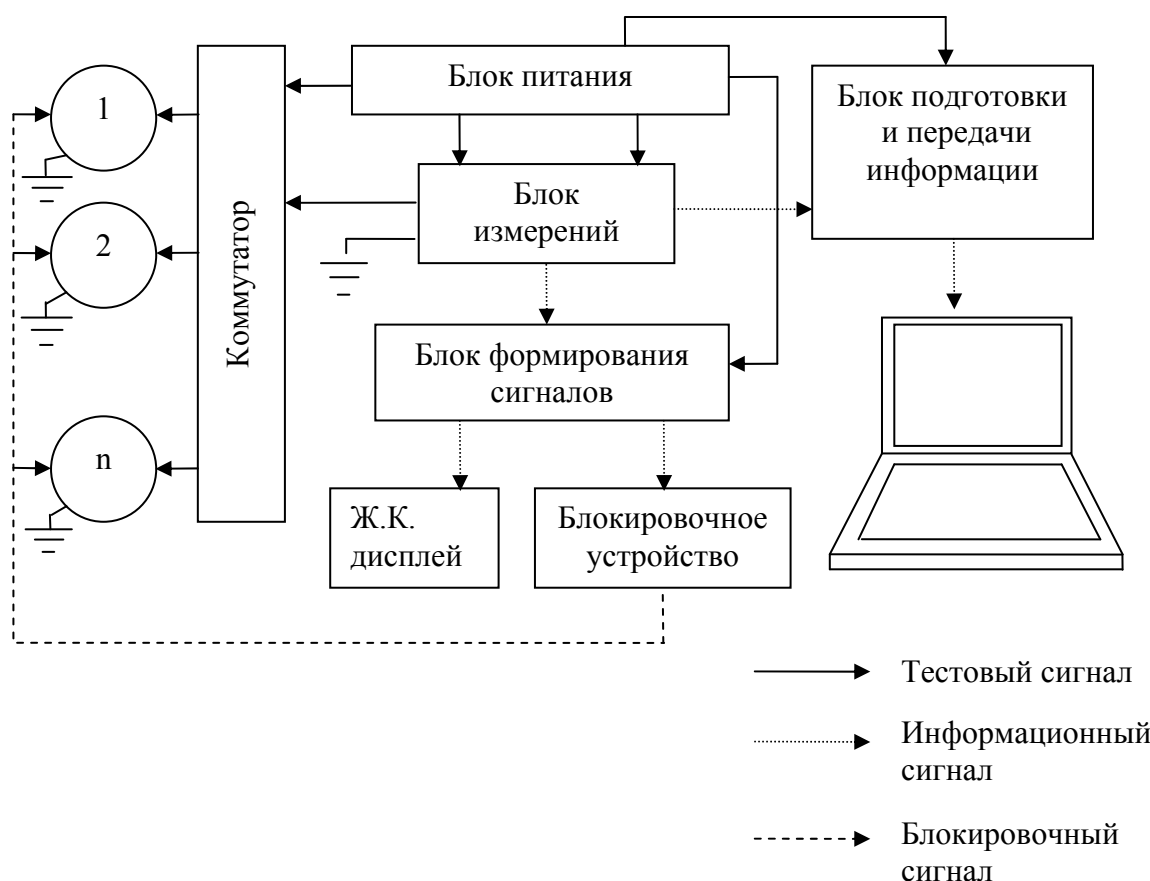


Рисунок 6 – Структурная схема информационно-измерительной системы контроля сопротивления обмотки статора электродвигателя [6]

Известен также мобильный программно – аппаратный комплекс (ПАК) для оперативной диагностики технического состояния насосно-компрессорного оборудования реализован на основе анализатора качества элект-

рической энергии AR5, персонального компьютера типа ноутбук и программы «Диагностика оборудования 0,4 кВ». Структурная схема и внешний вид программно - аппаратного комплекса (ПАК) для идентификации

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

технического состояния машинных агрегатов представлены на рисунке 7 [7].

В базе данных программы хранится диагностический словарь, где каждому виду повреждений машинных агрегатов соответствуют образы в бинарном коде. Важным преимуществом ПАК является возможность выполнения диагностических мероприятий на работающем оборудовании (находящимся

под напряжением) в щитке питания распределительной трансформаторной подстанции. В условиях взрывоопасных производств предприятий нефтегазовой отрасли это имеет очень важное значение, так как доступ к токоведущим частям машинных агрегатов во взрывозащищенном исполнении затруднен [7].

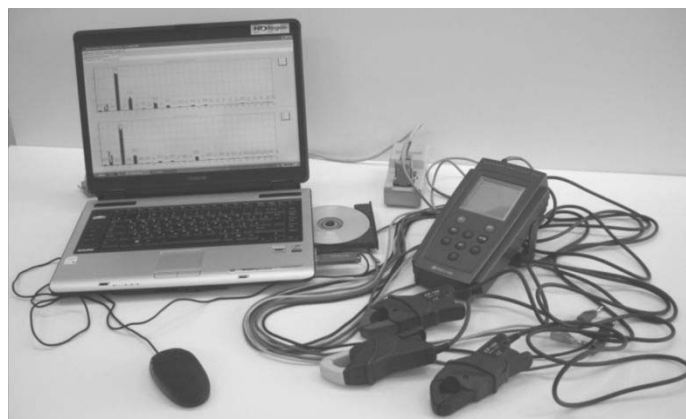


Рисунок 7 – Программно аппаратный комплекс для идентификации технического состояния машинных агрегатов и его внешний вид [7]

Многообещающим методом диагностики изоляции электромоторов является метод, использующий эффект акустической эмиссии. Суть этого явления заключается в возникновении звуковых волн при растрескивании полимерного материала. В общем случае этот эффект характерен при пластических деформациях практически любых твердых материалов.

Энергию излома или пластической деформации изоляции обнаруживают с помо-

щью тензодатчиков или чувствительных микрофонов и преобразуют в электрический сигнал. Данные о скорости эмиссии, общем числе вспышек, их амплитуде накапливаются в памяти персонального компьютера. Специальная компьютерная программа обрабатывает полученные данные и определяет состояние изоляции. По амплитуде импульсов акустической эмиссии выдается результат о размерах дефектов в изоляции, а по частоте – об их числе (рисунок 8) [8].

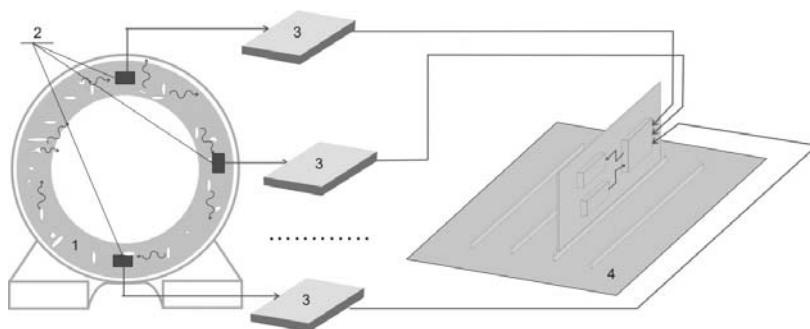


Рисунок 8 – Метод акустической эмиссии: 1 – изоляция статора, чувствительные приемники акустических сигналов, 3 – полосовые фильтры, 4 – устройство обработки поступающих данных

На основе приведенных данных об имеющихся на сегодняшний день методах и приборах диагностики изоляции электродви-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

гателей в АлтГТУ им. И.И. Ползунова был разработан метод определения остаточного ресурса асинхронного двигателя, с использо-

ванием системы нечеткой логики, использующий программную среду Matlab и пакета Fuzzy Logic.

Описанные выше приборы основаны на различных принципах действия и имеют в своей основе выходные данные, касающиеся качества изоляции АД, представленные как в цифровой форме, с различной размерностью, так и в нечетких терминах (высокий, низкий, средний). Интерпретировать такие данные с целью оценки остаточного ресурса АД сложно без использования понятий нечеткой логики. С этой целью разработана структурная схема (рисунок 9) системы определения остаточного ресурса АД на базе Fuzzy Logic.

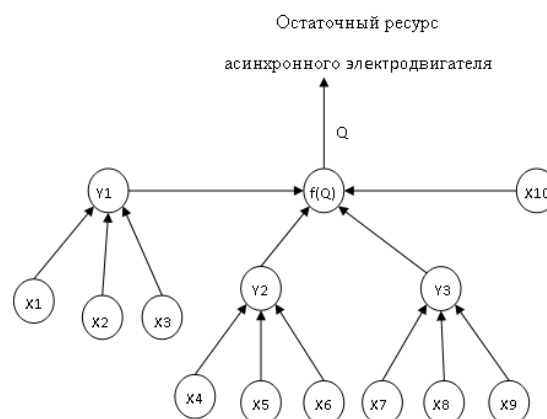


Рисунок 9 – Иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода об остаточном ресурсе асинхронного двигателя

Таблица 2 – Совокупность влияющих факторов к рисунку 9

Обозначение фактора	Описание фактора
X1	Температура обмотки статора АД
X2	Оценка состояния подшипников
X3	Величина тока холостого хода
X4	Величина сопротивления изоляции обмотки статора электродвигателя относительно корпуса
X5	Величина воздушного зазора между статором и ротором АД
X6	Коэффициент мощности (cos φ) АД
X7	Величина сопротивления обмоток статора (проводникового материала) при постоянном токе
X8	Коэффициент абсорбции
X9	Коэффициент поляризации
X10	Остаточный ресурс АД, определенный способом акустической диагностики изоляции обмотки статора
Y1, Y2, Y3	Укрупненные влияющие факторы
Q	Корень дерева – Остаточный ресурс асинхронного электродвигателя

Предложенный метод определения остаточного ресурса асинхронного двигателя с использованием системы нечеткой логики позволяет более объективно определять остаточный ресурс асинхронных электродвигателей, поскольку основан на учете 10-ти параметров (x1-x10), описанных в таблице 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустическая диагностика изоляции обмоток асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / Н.Т. Герцен. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://elibr.altstu.ru/elibr/disser/2007/gercen.pdf>. – Загл. с экрана.
2. Асинхронные машины / И.М. Коголь. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/electro/0080.htm>. – Загл. с экрана.

3. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов / А.И. Пахомов. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: http://kubsau.ru/dep_diss/files/20081029pakhomov.pdf. – Загл. с экрана.
4. Устройство для оценки технического состояния изоляции обмоток электродвигателя / О.И. Хомутов; С.О. Хомутов; А.А. Грибанов; А.В. Левачев; В.И. Сташко; Г.В. Суханкин. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: http://www.ntpo.com/patents_electronics/electronics_5/electronics_200.shtml. – Загл. с экрана.
5. Диагностическое оборудование для проверки якорей и статоров электродвигателей / А. И. Бегиев, В. А. Тихонов. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: http://www.remserv.ru/cgi/download/RS_01_2009_58-62.pdf. – Загл. с экрана.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6. Новейшие системы диагностики состояния электродвигателей. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: http://kart.od.ua/Sistema_diaagnostiki.html. – Загл. с экрана.
7. Филиал Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский Государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.sgm-oil.ru/articles/konkurs2/nominatsia2/proekt3.pdf>. – Загл. с экрана
8. База патентов российской федерации. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.L-Card.ru>. – Загл. с экрана
9. Материалы юбилейной конференции. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.vitc.ru/electrotech/2007/02/pdf/2007-02-05.pdf>. – Загл. с экрана
10. Метод ударных импульсов SPM для диагностики условий работы и состояния подшипников качения. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.pkspb.ru/service/vibro/01>. – Загл. с экрана.
11. Диагностические и измерительные приборы. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.chauvin-arnoux.ru/MEGOMETERS.htm>. – Загл. с экрана
12. Характеристики частичных разрядов, используемые при диагностике. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.ema.ru/view/articles/198>. – Загл. с экрана.
13. Перспективные технологии и новые разработки. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2010]. – Режим доступа: <http://www.pergam.ru>. – Загл. с экрана
14. Современное состояние виброакустической диагностики. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book23>. – Загл. с экрана.
15. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2011]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php>. – Загл. с экрана.

Воробьев Н.П., д.т.н., профессор, каф. ЭПБ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-08-82, 36-71-29, E-mail: vnprol51p@ya.ru;

Суханкин Г.В., к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8 (3852) 29-07-44;

Герцен Н.Т., к.т.н., тел.: 8 (3852) 26-04-98.