

## СИСТЕМА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

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

*В статье обоснован метод определения остаточного ресурса асинхронного электродвигателя на основе использования нечеткой логики, приведена структура разработанной системы нечеткой логики и результаты модельных экспериментов по определению остаточного ресурса асинхронного электродвигателя.*

*Ключевые слова: асинхронный, электродвигатель, фактор, нечеткая, логика, эксплуатация, изоляция, остаточный ресурс, диагностика.*

Асинхронные электродвигатели (АД) 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 его паспортных данных.

Однако в реальной жизни имеет место значительное отступление от номинальных режимов эксплуатации.

Изоляция электрических машин подвергается ряду неблагоприятных факторов: повышенные нагревы, превышающие допустимые для данного класса изоляции пределы, повышенная влажность вплоть до непосредственного воздействия воды и влаги, наличие химически агрессивной среды (аммиак, органические удобрения и т. д.), значительные механические воздействия (вибрации, ударные воздействия), коммутационные воздействия, значительные колебания напряжения в сети, технологические перегрузки, нарушение охлаждения, нестабильные климатические условия, наличие пыли, копоти, абразивных частиц в воздухе.

Помимо неблагоприятных факторов эксплуатации АД в агропромышленном комплексе необходимо отметить полное и частичное отсутствие диагностической аппаратуры, ремонтной базы, недостаточный уровень квалификации обслуживающего персонала, нарушение правил технической эксплуатации, а также отсутствие планово-предупредительного ремонта.

В этих условиях наблюдаются разрушения полимерной изоляции, резко сокращает-

ся срок службы оборудования, снижается надежность эксплуатации.

Выход из строя АД приводит к тяжелым авариям и большому материальному ущербу, связанному с простоем технологического оборудования, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя электродвигателя [1].

Следовательно, эффективный контроль показателей качества АД в процессе производства и после их изготовления, своевременная их диагностика в процессе эксплуатации и основанное на этих результатах управление качеством изготовления электродвигателей, являются актуальными задачами.

На основании известных данных об имеющихся на сегодняшний день методах диагностики изоляции АД можно сделать вывод о том, что не существует метода, с помощью которого можно однозначно определить остаточный ресурс электродвигателя.

Приборы, используемые для измерения различных параметров электродвигателя, основаны на различных принципах действия и имеют выходные данные, представленные как в цифровой форме, с различной размерностью, так и в нечетких термах (высокий (в), низкий (н), средний (с), ниже среднего (нс), выше среднего (вс) ...).

Интерпретация таких данных с целью оценки остаточного ресурса АД проблематична без использования понятий нечеткой логики.

Учитывая вышесказанное, авторами статьи разработан метод определения остаточного ресурса АД с помощью нечеткой логики в программной среде MatLabFuzzyLogicToolbox.

При разработке упомянутого метода выявилась необходимость решения *следующих задач*:

- анализ состояния разработок и методов определения остаточного ресурса АД;
- выявление особенностей эксплуатации АД в сельском хозяйстве и их влияние на физико-механические свойства изоляции;
- составление совокупности измеряемых диагностических параметров, по которым можно судить об остаточном ресурсе АД;
- обоснование выбора влияющих факторов;
- выбор приборов для измерения влияющих факторов и их единиц измерения;
- определение диапазонов измерений параметров для оценки остаточного ресурса АД;
- разработка структуры системы нечеткой логики в программной среде MatlabFuzzyLogicToolbox для определения остаточного ресурса АД;
- разработка m-файла conc.m для управления fis-файлами и для работы всей системы нечеткой логики в целом;
- представление и анализ результатов модельных экспериментов по определению остаточного ресурса АД.

Иерархическая структура системы нечеткой логики для определения остаточного ресурса АД древовидного типа представлена на рисунке 1.

В такой системе входной вектор диагностических признаков:

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

где  $n$  – число признаков (факторов).

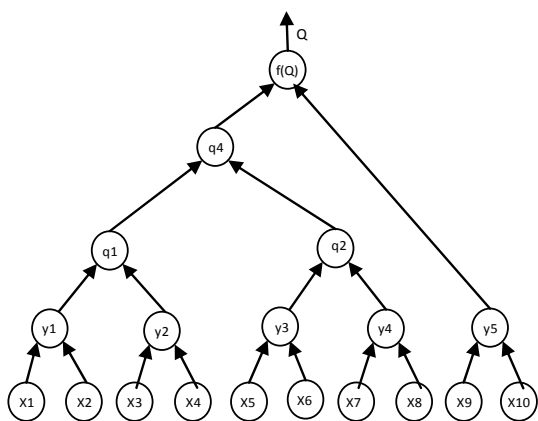


Рисунок 1 – Иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода для остаточного ресурса АД:  $x_1$  –  $x_9$  – входные диагностические факторы системы,  $y$ ,  $q$  – промежуточные параметры,  $Q$  – выход системы

В таблице 1 более подробно описаны влияющие факторы к рисунку 1.

Таблица 1 – Совокупность влияющих факторов к рисунку 1

Обозначение фактора	Описание фактора
x1	Измерение величины тока холостого хода АД
x2	Измерение величины воздушного зазора АД
x3	Измерение величины сопротивления изоляции двигателя
x4	Измерение коэффициента мощности АД
x5	Измерение величины сопротивления обмоток АД при постоянном токе
x6	Измерение коэффициента абсорбции изоляции обмотки статора
x7	Измерение коэффициента поляризации изоляции обмотки статора
x8	Остаточный ресурс электродвигателя, определенный способом акустической диагностики изоляции статора АД [2]
x9	Температура статора АД
x10	Оценка состояния подшипников
y1, y2, y3, y4, y5, q1, q2, q4	Укрупненные влияющие факторы
Q	Корень дерева – остаточный ресурс АД

Разработанная система диагностики базируется на понятии нечеткого множества  $\tilde{A}$ , на универсальном множестве  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ , которое записывается в виде [3]:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i) / u_i,$$

или

$$\tilde{A} = (\mu_A(u_1) / u_1, \mu_A(u_2) / u_2, \dots, \mu_A(u_k) / u_k),$$

где  $\mu_A(u_i) / u_i, i=1 \dots k$  – степени принадлежности.

В общем виде такая система определения остаточного ресурса включает в себя фазсификацию данных, их обратное преобразование и правила (рисунок 2).

**СИСТЕМА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

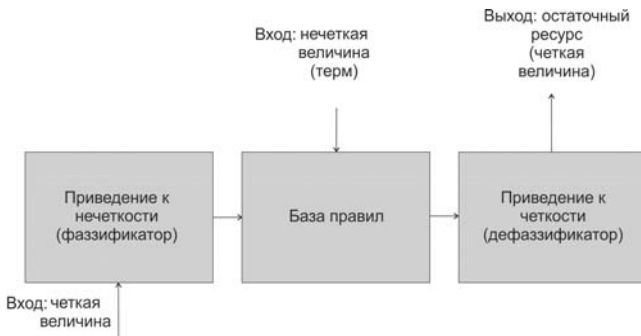


Рисунок 2– Структура диагностической системы

В связи с тем, что диагностические признаки носят случайный характер, в системе используются модифицированные функции, основанные на Гауссовой функции принадлежности:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right),$$

где:  $u$  – абсцисса,  $b$  – координата максимума,  $c$  – коэффициент концентрации.

Например, функции принадлежности для коэффициента поляризации изоляции показаны на рисунке 3.

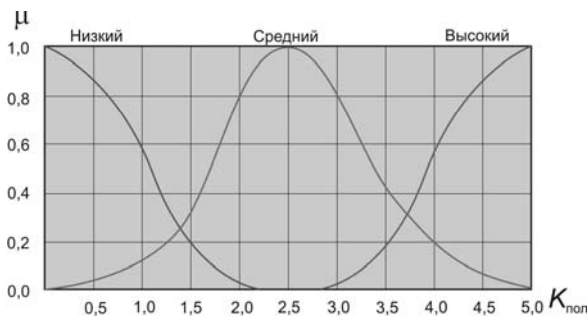


Рисунок 3 – Функции принадлежности для коэффициента поляризации:  $K_{пол}$  – коэффициент поляризации,  $\mu$  – степень (функция) принадлежности

В общем виде правила логического вывода (база правил, рисунок 2) выглядят так:

$R_1$ : ЕСЛИ  $x_1$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{11}$  ... И ...  $x_n$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{1n}$ , ТО  $y$  ЕСТЬ  $V_1$

...

$R_2$ : ЕСЛИ  $x_1$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{21}$  ... И ...  $x_n$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{2n}$ , ТО  $y$  ЕСТЬ  $V_2$

...

$R_m$ : ЕСЛИ  $x_1$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{m1}$  ... И ...  $x_n$  ЕСТЬ  $\mu(u)_{mn}$ , ТО  $y$  ЕСТЬ  $V_m$ , где  $x_k, k=1..n$  – входные переменные;  $y, V_i, i=1..m$  – выходная переменная;  $\mu(u)_{ik}$  – заданные нечеткие множества с функциями принадлежности[4].

Дефаззификация проводилась по методу центра тяжести:

$$\frac{\sum_{i=1}^k u_i \mu_A(u_i)}{\sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)}$$

Нечеткая модель состоит из управляющего  $m$ -файла (сопс.m) и 9-ти систем нечеткого вывода: q\_y1.fis, q\_y2.fis, q\_y3.fis, q\_y4.fis, q\_y5.fis, q\_q1.fis, q\_q2.fis, q\_q4.fis, Q.fis.

Каждая система нечеткого вывода имеет по 2 входных фактора, непосредственно влияющих на остаточный ресурс АД.

Так как значения входных факторов изменяются в различных пределах, то целесообразно использовать дополнительный  $m$  – файл – нормализатор.

Нормализатор представляет собой программу, листинг которой представлен на рисунке 4.

Запуск содержимого файла в командной строке Matlab показывает результат работы системы нечеткой логики при минимальных, максимальных и средних значениях контролируемых параметров.

В каталоге представлены системы нечеткого вывода с расширением .fis и  $m$ -файлы. Например, система нечеткого вывода q\_y1.fis имеет 2 входных фактора:  $x_1$  – величину тока холостого хода АД и  $x_2$  – изменение величины воздушного зазора АД.

Основным из  $m$ -файлов является файл сопс.m, который управляет работой всей системы (осуществляет иерархический вывод по логическому дереву).

В связи с тем, что исходная информация распределена, как правило, по случайному закону, для лингвистической оценки каждого фактора нами использованы 5 термов модификации стандартной функции распределения gaussmf – qgaussmf, которая позволяет использовать как четкие, так и нечеткие входные величины (рисунок 6).

Для этого в каталоге создаваемой системы нечеткой логики должны присутствовать

файлы qgaussmf, evalfis\_vv и qual\_inp\_gauss (рисунок 4).

```

1 - Zmin=60;
2 - Zmax=180;
3 - Процентное_Отклонение=round(100*(Zmax-Zmin)/(Zmax+Zmin));
4 - Кас_izm_p=120; %Вставить здесь!
5 - x1=((Zmax+Zmin)/2)-Кас_izm_p*(-Процентное_Отклонение/(((Zmax+Zmin)/2)-Zmin));
6
7
8 - Zmin=1;
9 - Zmax=475;
10 - Процентное_Отклонение=round(100*(Zmax-Zmin)/(Zmax+Zmin));
11 - Кас_izm_p=238; %Вставить здесь!
12 - x2=((Zmax+Zmin)/2)-Кас_izm_p*(-Процентное_Отклонение/(((Zmax+Zmin)/2)-Zmin));
13
14 % Нижний результат:
15 - conc(x1, x2, 'н', 'н', 'н', 'н', 'н', 'н', 'н', 'н');
16
17 % Высокий результат:
18 - conc(x1, x2, 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в');
19
20 % Средний результат:
21 - conc(x1, x2, 'с', 'с', 'с', 'с', 'с', 'с', 'с', 'с');
22
    
```

Рисунок 4 – Листинг программы Stroka\_conc\_2012\_03\_19.m

Особенности разработанного метода поясняются каталогом системы нечеткой логики (рисунок 5).

- conc.m
- Engine.m
- evalfis\_vv.m
- Normalizator.m
- Q.fis
- q\_q1.fis
- q\_q2.fis
- q\_q4.fis
- q\_y1.fis
- q\_y2.fis
- q\_y3.fis
- q\_y4.fis
- q\_y5.fis
- qgaussmf.m
- qual\_inp\_gauss.m
- Stroka\_conc\_2012\_03\_19.m
- transform.m

Рисунок 5– Каталог системы нечеткой логики с файлами

Для получения результатов нечеткого вывода ( $y_1 \rightarrow$  Промежуточный результат 1) по заданным факторам используются нечеткие базы знаний типа Mamdani (рисунок 7).

Для запуска смоделированной системы нечеткой логики в режиме максимальных значений факторов в командной строке Matlab вводят следующие данные (первое значение в нем выбрано низким – 'н' – с учетом того, что величина тока холостого хода АД должна принимать инверсное значение для достижения максимума значения Q– корня логического дерева – остаточного ресурса АД):

conc('н', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в');

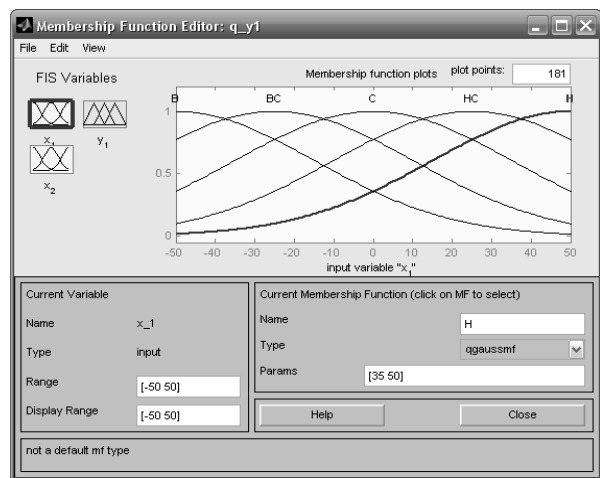


Рисунок 6 – Редактор функций принадлежности нечетких термов (н, нс, с, вс, в) для q\_y1.fis

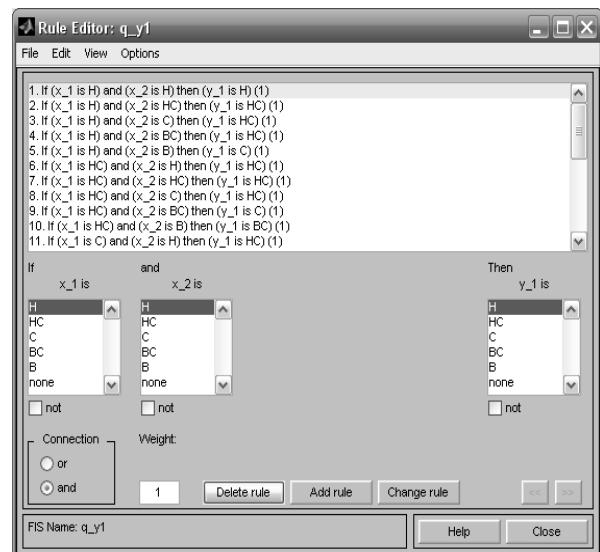


Рисунок 7– Нечеткая база знаний типа Mamdani (для q\_y1)

## СИСТЕМА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Ввод строки завершают командой «Enter».

При этом в командном окне Matlab получают значения всех укрупненных влияющих факторов  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, q_1, q_2, q_4$  и максимальный результат вычисления остаточного ресурса  $Q$  (в годах) АД с помощью системы нечеткой логики, так как всем остальным входным факторам присвоен нечеткий терм «высокое» (рисунок 8).

По показателям надежности согласно ГОСТ 183-74 средний срок службы АД составляет 20 000 – 50 000 ч в зависимости от типа двигателя, условий эксплуатации и технического обслуживания, с вероятностью безотказной работы не менее 0,9 за 10000 ч.

Значение  $Q=20$  лет получено при учете того, что рассматриваемый асинхронный электродвигатель ежедневно работал не более 7 часов в сутки при нормальных условиях эксплуатации.

```
>> cons('н', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в', 'в');
Промежуточный результат 1----->>
y1 =
    9.7980

Промежуточный результат 2----->>
y2 =
    53.5254

Промежуточный результат 3----->>
y3 =
    49.8018

Промежуточный результат 4----->>
y4 =
    53.6878

Промежуточный результат 5----->>
y5 =
    53.6878

Промежуточный результат Q1----->>
q1 =
    29.7720

Промежуточный результат Q2----->>
q2 =
    38.1739

Промежуточный результат Q4----->>
q4 =
    26.7258

Рейтинг остаточного ресурса асинхронного электродвигателя---->>
Q =
    31.8317

Остаточный ресурс асинхронного электродвигателя, лет----->>
Q =
    20.0000

>>
```

**Рисунок 8** – Результат работы системы нечеткого моделирования остаточного ресурса АД в зависимости от влияющих факторов

Аналогичным образом получают значения  $Q$  для режима минимальных, средних и произвольных значений входных факторов. Значения  $Q$  для режима максимальных, минимальных и средних значений входных факторов используются для калибровки системы нечеткой логики, а значения  $Q$  для режима произвольных значений входных факторов – для определения остаточного ресурса асинхронного электродвигателя (в годах).

Для того чтобы система нечеткой логики работала правильно и достоверно оценивала влияющие факторы, необходимо знать в каких диапазонах (таблица 2) изменяются входные факторы для оценки остаточного ресурса АД.

**Таблица 2** – Диапазоны измерений входных факторов для оценки остаточного ресурса АД

Факторы, определяющие остаточный ресурс АД	Диапазоны измерений входных факторов
Температура обмотки статора АД	От 60 °С до 180 °С
Измерение величины воздушного зазора между статором и ротором АД	Значение воздушного зазора: низкое, среднее, высокое
Измерение величины сопротивления изоляции двигателя	От 1кОм до 0,38 МОм
Измерение коэффициента мощности АД	Значение $\cos\phi$ : низкое, среднее, высокое
Измерение величины сопротивления обмоток АД при постоянном токе	От 1 кОм до 5 кОм
Остаточный ресурс электродвигателя, определенный методом акустической диагностики изоляции статора АД [2]	Значение остаточного ресурса: низкий, средний, высокий
Измерение величины тока холостого хода АД	От 1А до 475 А
Оценка состояния подшипников качения	Состояние подшипников: плохое, среднее, хорошее
Качество изоляции по показателю коэффициента поляризации	Изоляция: плохая, хорошая и превосходная
Качество изоляции по коэффициенту абсорбции	Изоляция: плохая, хорошая и превосходная

Результаты работы системы нечеткой логики на примере произвольных данных, соответствующих диапазонам измерений входных

факторов АД по таблице 2, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты работы системы нечеткой логики

Факторы для оценки остаточного ресурса АД	Значения факторов, взятые для модельного эксперимента	Значения факторов, приведенные в диапазон от -100 до 100 с помощью нормализатора	Остаточный ресурс асинхронного электродвигателя в годах
Температура обмотки статора АД	100 °С	-33,33	10,87
Измерение величины воздушного зазора между статором и ротором АД	среднее	среднее	
Измерение величины сопротивления изоляции двигателя	12 кОм	-94,19	
Измерение коэффициента мощности АД	среднее	среднее	
Измерение величины сопротивления обмоток АД при постоянном токе	3,5 кОм	25	
Остаточный ресурс электродвигателя, определенный методом акустической диагностики изоляции статора АД [2]	среднее	среднее	
Измерение величины тока холостого хода АД	200	-16,03	
Оценка состояния подшипников качения	хорошее	хорошее	
Качество изоляции по показателю коэффициента поляризации	плохая	плохая	
Качество изоляции по коэффициенту абсорбции	хорошая	хорошая	

По полученному значению остаточного ресурса с помощью пакета FuzzyLogic программы Matlab можно сделать вывод о том, что остаточный срок службы составляет около 11 лет (при учете того, что данный АД работал не более 7 часов в сутки и в нормальных условиях эксплуатации).

Полученное значение остаточного ресурса с помощью пакета FuzzyLogic программы Matlab при наихудших (по условиям эксплуатации) значениях контролируемых факторов составило 0 лет.

При средних значениях контролируемых факторов оно составило 10 лет.

При наилучших (по условиям эксплуатации) значениях контролируемых факторов оно составило 20 лет.

Диагностический измерительный комплекс[2], использованный в системе нечеткой логики, приведен на рисунке 9.

#### Выводы

1. Сформулированы задачи, решение которых необходимо для однозначного определения остаточного ресурса АД.

2. Разработан метод определения остаточного ресурса АД с использованием системы нечеткой логики в программной среде Matlab и пакете FuzzyLogic.

3. Разработана система нечеткой логики для определения остаточного ресурса АД.

4. Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о том, что система нечеткой логики по определению остаточного ресурса АД функционирует исправно и готова к работе.

СИСТЕМА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

5. Разработан нормализатор системы нечеткой логики для определения остаточного ресурса АД.

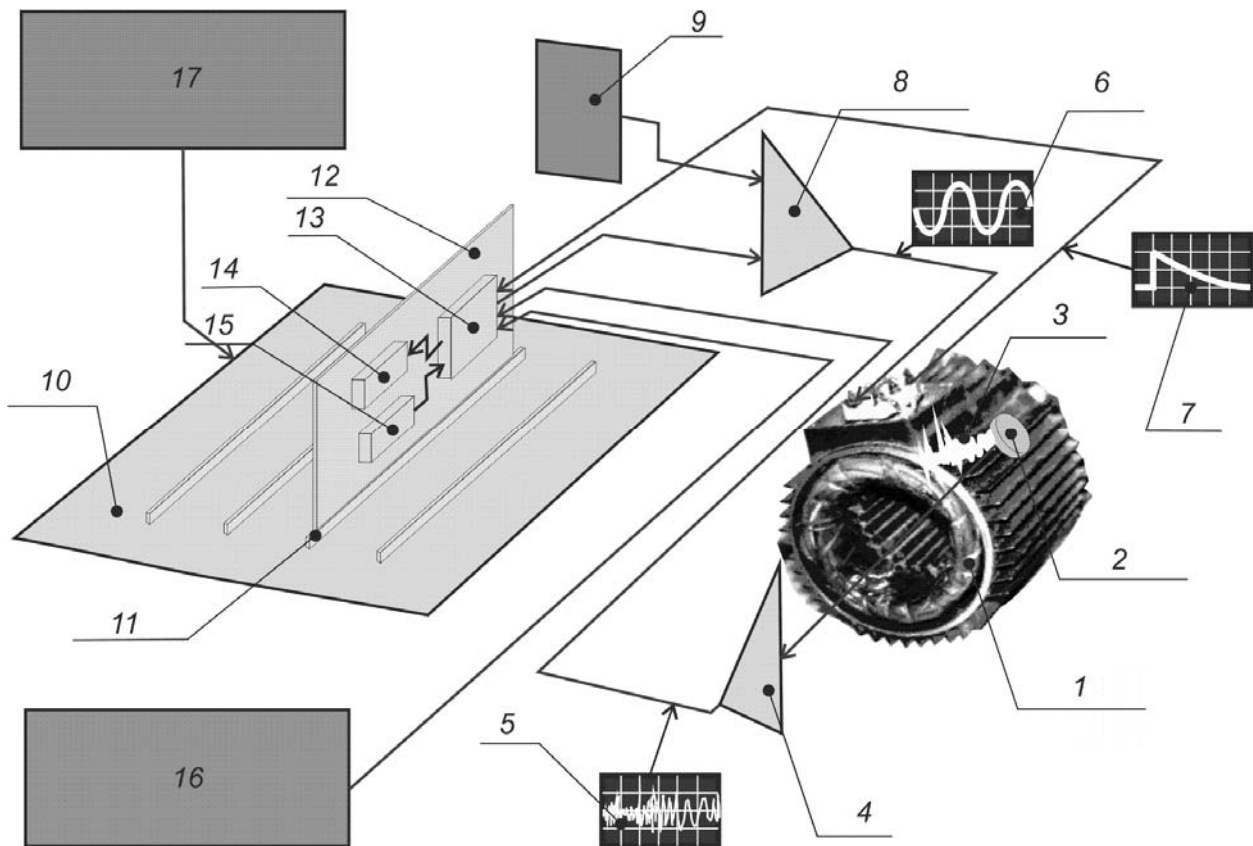


Рисунок 9 – Диагностический комплекс для определения остаточного ресурса АД методом акустической диагностики изоляции статора: 1 – обмотка АД+изоляция, 2 – акустический датчик, 3 – корпус АД, 4 – усилитель, 5 – усиленный выходной акустический сигнал, 6 – синусоидальный сигнал, подаваемый в обмотку, 7 – диагностический сигнал, снимаемый с обмотки, 8 – усилитель, 9 – источник тока, 10 – материнская плата, 11 – слот PCI, 12 – специализированная карта ввода-вывода, 13 – порт ввода-вывода, 14 – аналого-цифровой преобразователь, 15 – цифро-аналоговый преобразователь, 16 – эталонный источник сигнала, 17 – программное обеспечение, включая MatLab

6. Разработанная система нечеткой логики позволит обоснованно определять остаточный ресурс АД по результатам измерения величины тока холостого хода, воздушного зазора, сопротивления изоляции, коэффициента мощности, сопротивления обмоток при постоянном токе, коэффициента абсорбции изоляции обмотки статора, коэффициента поляризации изоляции обмотки статора, модуля упругости изоляции [2], температуры статора и по оценке состояния подшипников.

7. Полученные результаты при их реализации помогут предотвратить выход из строя АД и снизить материальный ущерб, связанный с простоем технологического оборудования, устранением последствий аварий и ремонтом вышедшего из строя самого электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения: материалы лекций [Текст]/ О.Д.Гольдберг.–М.: Знание, 1976. – 57 с.
2. Пат. 2436081 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/11 (2006/01). Способ акустической диагностики изоляции обмоток асинхронного электродвигателя / Герцен Н.Т., Суханкин Г.В., Воробьев Н.П.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «Алт. гос. техн. ун-т. Им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) – № 2010129672/28; заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 12 с.: ил.
3. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab [Текст]/ С.Д. Штовба.– М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
4. Правила логического вывода / [Электронный ресурс]. – Электрон.дан. – М., [2012]. – Режим доступа: <http://www.itfru.ru/index.php/fuzzy-logic> - Загл. с экрана.

СУХАНКИН Г.В., ВОРОБЬЕВ Н.П., ВОРОБЬЕВА С.Н.

**Суханкин Г.В.**, к.т.н., директор информационно-издательского центра, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: [gen195@mail.ru](mailto:gen195@mail.ru), тел.: 8(3852) 29-07-44;

**Воробьев Н.П.**, д.т.н., профессор кафедры Электрификация производства и быта, АлтГТУ

им. И.И. Ползунова, E-mail: [vnpro151p@ya.ru](mailto:vnpro151p@ya.ru), тел.: 8(3852) 36-71-29;

**Воробьева С.Н.**, аспирант кафедры Электрификация производства и быта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: [2011led22@mail.ru](mailto:2011led22@mail.ru), тел.: 8(3852) 36-71-29