

## Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики

И.С. Куприянов, А.В. Лукьянов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

### Резюме

В настоящий момент в технике наблюдается тренд на усложнение конструкций, а именно оптимизацию используемых ресурсов, повышение безопасности и экологичности работы, уменьшение участия в ней человека. В связи с этим модели оценки технического состояния при планово-предупредительной системе ремонта и проводимых в рамках нее мероприятий приводят к избыточным финансовым расходам на поддержание работы оборудования. При этом не обеспечиваются достаточные гарантии исключения внезапных отказов. Поэтому актуальной задачей является разработка систем оценки технического состояния и функциональной диагностики оборудования в реальном времени. В статье произведена оценка факторов, влияющих на асинхронные электродвигатели, выполнено структурирование параметров и определение показателей, максимально отражающих их текущее состояние. Одной из характеристик, наиболее полно описывающей физический принцип работы электродвигателя, является ток в обмотках статора. Связь тока и внешнего магнитного поля позволяет изучить развивающиеся дефекты без серьезной коррекции системы оценки. Например, анализ текущего состояния тока дает возможность с достаточной точностью диагностировать «явные» неисправности асинхронных электродвигателей и определять степень их развития. Это было проверено и реализовано при исследовании данных, полученных в ходе конечно-элементного моделирования. Для развития метода прогнозирования работы асинхронных электродвигателей необходима доработка математического аппарата с возможностью дополнения метода данными анализа спектрального состава вибрации, сигнала тока и внешнего магнитного поля.

### Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, обмотки статора, нечеткая логика, дефект, ток статора, техническое состояние, диагноз

### Для цитирования

Куприянов И.С. Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики / И.С. Куприянов, А.В. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 10–21. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).10-21.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.02.2023; поступила после рецензирования: 17.03.2023 г.; принята к публикации: 20.03.2023 г.

## Evaluation of the technical condition of asynchronous electric motors using fuzzy logic apparatus

I.S. Kupriyanov, A.V. Luk'yanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

### Abstract

There is a trend in technology towards structures complication for such reasons as optimizing the resources used, improving safety, reducing human participation in operation and environmental friendliness of work. In this regard, models for assessing the technical condition, in particular, the planned preventive system and the measures carried out on their basis lead to excessive financial costs for maintaining the operation of equipment, without sufficient guarantees against sudden failures. Therefore, an urgent task is to develop systems for the real time evaluation of technical condition of equipment and its functional diagnostics. The factors affecting the state of the induction motor are evaluated, their structuring is carried out and the most important indicators reflecting the state of the machine are determined. One of the parameters most fully describing the state of the machine due to the principles of operation is the current in the stator windings. Also, the connection of the current and the external magnetic field allows to study the developing defects without a serious correction of the evaluation system. For example, the analysis of the actual state of the current makes it possible to distinguish with sufficient accuracy the «pure» malfunctions of the machine and determine the degree of their development, which was verified by analyzing the data obtained during finite element modeling. To develop the method of predicting the machine condition, a revision of the math device is necessary with the possibility of analyzing the spectral composition of a current signal or an external magnetic field.

### Keywords

asynchronous electric motor, stator windings, fuzzy logic, defect, stator current, technical condition, diagnosis

**For citation**

Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyanija asinkhronnykh elektrodvigatelyi s pomoshch'yu apparata nechetkoi logiki [Evaluation of the technical condition of asynchronous electric motors using fuzzy logic apparatus]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 10–21. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).10-21.

**Article info**

Received: February 17, 2023; Revised: March 17, 2023; Accepted: March 20, 2023.

**Введение**

На сегодняшний день в промышленности наиболее широко применяется планово-предупредительная система обслуживания [1, 2]. Данная система технического обслуживания используется на предприятиях генерации и распределения электрической энергии, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства, в том числе и для критически важных систем, не имеющих дублирования, внеплановый выход из строя которых приводит к большим потерям. Цель подобной системы заключается в планировании выведения оборудования из эксплуатации и проведения его технического обслуживания ранее момента отказа, определяемого статистической вероятностью.

При этом сложность конструкции современного машинного оборудования из-за большого разнообразия используемых узлов, а также переменного характера эксплуатационных нагрузок [2] возрастает. Поэтому в реальных условиях эксплуатации сильная функциональная и линейная связь между временем наработки и сроком эксплуатации возможна только в случае механического износа и разрушения деталей и узлов оборудования. Это приводит к тому, что практически невозможно с приемлемой точностью прогнозировать срок, в течение которого оборудование способно работать без технических отказов.

Даже типовое и широко распространенное оборудование, как, например, асинхронные электродвигатели (АЭД) одной и той же модели, но установленные в разных подсистемах одного и того же комплекса (например, электровоза), подвергающиеся стохастическому характеру воздействий таких факторов, как температура окружающей среды, продолжительность работы, характер нагрузки, качество обслуживания и ремонта, имеют различное фактическое состояние [1]. Отсюда можно сделать вывод, что система планово-предупредительного ремонта не способна полностью предотвратить отказы оборудования,

так как увеличивает издержки за счет вывода из эксплуатации бездефектного оборудования.

Следовательно, для предотвращения потерь необходимо разработать методическую базу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию оборудования [1].

В настоящее время АЭД, являющиеся основной частью электроприводных агрегатов, диагностируются двумя способами: токовым (рассматриваются в основном амплитуды токов) и вибрационным (рассматриваются в основном амплитудные и спектральные характеристики). Однако текущий анализ данных контроля не всегда дает возможность выявить неисправности на начальной стадии их появления, при этом затруднено определение степени развития дефектов. В результате, невозможно прогнозировать изменение технического состояния агрегатов во времени. Поэтому разработка комплексного критерия оценки технического состояния оборудования, в частности АЭД, является важной задачей.

В данной статье в основном рассматривается возможность анализа тока в обмотках статора для проведения комплексной диагностики с использованием математического аппарата нечеткой логики для комплексной оценки состояния асинхронного двигателя, также имеется возможность использования других параметров состояния АЭД.

**Диагнозы состояний асинхронного электродвигателя в системе функциональной диагностики**

Степень повреждения АЭД будет удобно оценивать, используя следующую классификацию для оценки надежности технических систем:

$D_1$  – исправное состояние, машина полностью работоспособна и может эксплуатироваться без ограничений;

$D_2$  – поврежденное состояние, в машине развивается дефект, необходимо изменить режим эксплуатации, снизив нагрузку и/или включить ее в план ближайшего ремонта или замены;

$D_3$  – аварийное состояние, требуется немедленный вывод из эксплуатации в связи с приближением критических повреждений.

Три приведенных класса будут использованы как основные типы диагнозов, которые подлежат распознаванию. Определим входные (анализируемые) параметры, получаемые при диагностике состояния АЭД:  $x_1$ – $x_{20}$  (табл. 1) [2, 3].

Введем классы входных переменных, сгруппировав параметры состояния АЭД по видам измерений и испытаний:

$Q_1$  – электрические и магнитные методы контроля ( $x_1$ – $x_9$ );

$Q_2$  – визуально-механические методы контроля ( $x_{10}$ – $x_{12}$ ,  $x_{16}$ ,  $x_{20}$ );

$Q_3$  – вибрационный контроль ( $x_{13}$ – $x_{15}$ );

$Q_4$  – тепловизионный контроль ( $x_{17}$ – $x_{19}$ ).

Структурная схема анализа входных параметров относительно метода контроля технического состояния в рамках использования аппарата нечеткой логики приведена на рис. 1.

Распределим входные переменные на классы:

**Таблица 1.** Параметры состояния асинхронного электродвигателя, получаемые при диагностике  
**Table 1.** Parameters of the asynchronous motor state obtained during diagnostics

$x_i$	Названия параметров состояния State parameter names
$x_{1.1}$	Ток фазы А статора Phase A current of stator
$x_{1.2}$	Ток фазы В статора Phase B current of stator
$x_{1.3}$	Ток фазы С статора Phase C current of stator
$x_2$	Значение напряженности внешнего магнитного поля The value of the strength of the external magnetic field strength
$x_3$	Распределение напряженности внешнего магнитного поля Distribution of the external magnetic field strength
$x_4$	Сопротивление обмоток статора по постоянному току DC stator winding resistance
$x_5$	Состояние изоляции обмоток статора Stator winding insulation condition
$x_6$	Потери мощности холостого хода Idle power loss
$x_7$	Сопротивления изоляции вводов Input insulation resistance
$x_8$	Пробивное напряжение изоляции обмоток Breakdown voltage of winding insulation
$x_9$	Состояние стержней ротора (по параметрам внешнего магнитного поля) The state of the rotor bars (according to the parameters of the external magnetic field)
$x_{10}$	Степень износа подшипников Bearing wear
$x_{11}$	Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity
$x_{12}$	Коэффициент пресовки обмоток Winding pressing factor
$x_{13}$	Радиальная составляющая вибрации Radial vibration component
$x_{14}$	Тангенциальная составляющая вибрации Tangential component of vibration
$x_{15}$	Колебания угловой скорости вращения ротора Oscillations of the angular velocity of rotation of the rotor
$x_{16}$	Скорость вращения ротора (скольжение) Rotor speed (slip)
$x_{17}$	Температура корпуса Case temperature
$x_{18}$	Температура обмоток Windings temperature
$x_{19}$	Температура контактов Contact temperature
$x_{20}$	Момент на валу Shaft torque

$X_1$  – состояние обмоток;  
 $X_2$  – состояние магнитопровода;  
 $X_3$  – состояние ротора;  
 $X_4$  – состояние контактов и соединителей;  
 $X_5$  – состояние подшипников и корпуса.

Для оценки параметров будем применять лингвистические переменные  $x_1$ – $x_{20}$ . Для оценки  $x_1$ – $x_7$  и  $x_{17}$ – $x_{19}$  используем единую шкалу: Н – низкий, С – средний, В – высокий. Для  $x_8$  примем Р – равномерный, НР – неравномерный. Исключением будут являться параметры  $x_9$ – $x_{16}$  и  $x_{20}$ : Д – допустимое, НД – недопустимое. Каждый из терминов представляет собой нечеткое множество, заданное функцией принадлежности. Для итоговой оценки приведенных классов входных переменных используем разработанное множество терминов состояния:

$A_{11}$  – нормальное состояние магнитопро-

вода;  
 $A_{12}$  – перегревы в магнитопроводе (80–90°C);  
 $A_{13}$  – перегревы в магнитопроводе (90–100°C);  
 $A_{14}$  – перегревы в магнитопроводе (выше 100°C);  
 $A_{21}$  – нормальное состояние обмотки;  
 $A_{22}$  – межвитковые замыкания обмоток;  
 $A_{23}$  – изменения сопротивления обмоток;  
 $A_{24}$  – деформация обмоток;  
 $A_{25}$  – ослабление прессовки обмоток;  
 $A_{31}$  – исправные соединения контактной коробки;  
 $A_{32}$  – перегрев соединений контактной коробки;  
 $A_{41}$  – изменения формы сигнала тока в одной или нескольких фазах;

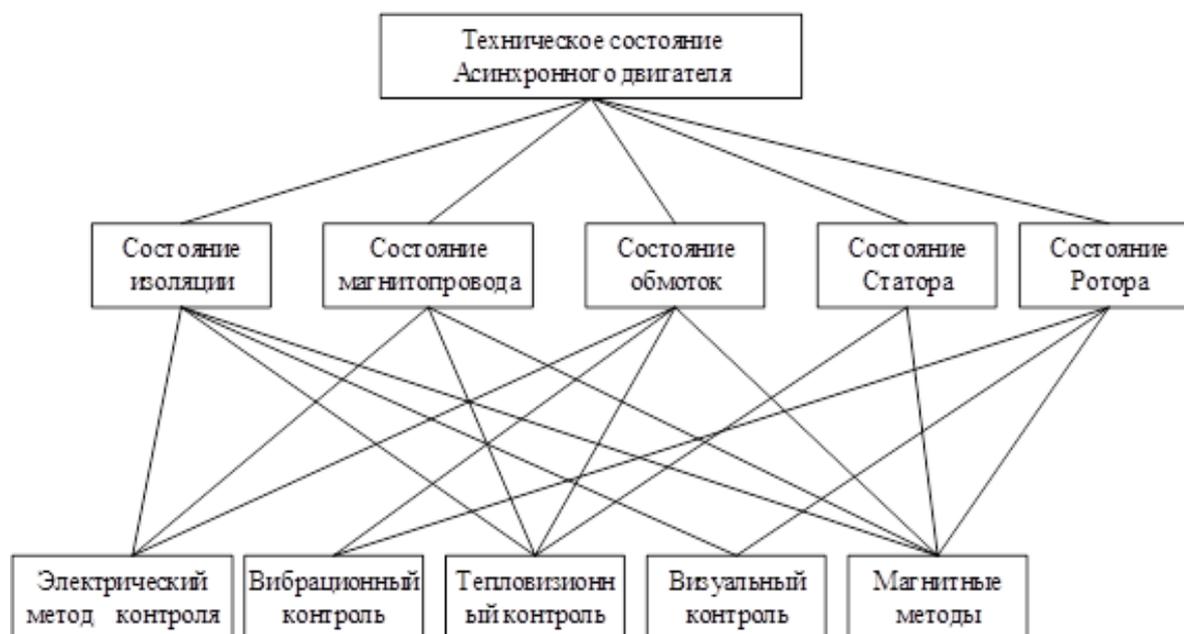


Рис. 1. Структура нечеткого логического вывода о состоянии асинхронного электродвигателя

Fig. 1. The structure of the fuzzy logical inference about the state of the induction motor

Таблица 2. Пример матрицы знаний для некоторых состояний асинхронного электродвигателя

Table 2. An example of a knowledge matrix for some states of induction motor

Параметры состояния Status Parameters								Состояние Status
$x_{1.1}$	$x_{1.2}$	$x_{1.3}$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_{15}$	$x_{16}$	
С	С	С	С	НР	С	Н	В	$A_0$
С	В	Н	В	НР	С	С	В	$A_{46}$
В	В	Н	В	НР	С	В	В	$A_{46}$
В	С	С	В	НР	Н	С	В	$A_{26}$
В	В	В	В	НР	Н	В	В	$A_{26}$
В	В	В	В	Р	С	В	В	$A_{62}$
В	В	В	В	Р	С	Н	В	$A_{63}$

$A_{42}$  – асимметрия питающих токов;  
 $A_{51}$  – нормальная напряженность магнитного поля;  
 $A_{61}$  – превышение допустимой нагрузки на валу;  
 $A_{62}$  – обрыв одного или нескольких стержней беличьей клетки ротора;  
 $A_{63}$  – перегрев ротора;  
 $A_{64}$  – статический эксцентриситет;  
 $A_{65}$  – динамический эксцентриситет;  
 $A_{71}$  – нормальное состояние изоляции;  
 $A_{72}$  – естественное старение изоляции;  
 $A_{73}$  – ускоренное старение изоляции (электрический пробой);  
 $A_{74}$  – ускоренное старение изоляции (тепловой пробой) [4].

Рассмотрим пример матрицы знаний для состояний обмоток статора с использованием электрических методов, что обусловлено отсутствием необходимости внесения изменений в конструкцию и простотой реализации измерений (табл. 2).

Наиболее перспективным с точки зрения точности постановки диагноза представляется анализ параметров, не требующих внесения изменений в конструкцию двигателя или вносящих незначительные изменения во внешние цепи питания. Такими параметрами являются: внешнее магнитное поле АЭД, механические колебания и значения токов в обмотках статора, колебание скорости вращения ротора [5–7].

Текущее значение тока статора дает информацию о неисправности двигателя. Ток статора формирует магнитное поле АЭД и приводит в движение ротор. Поэтому ток статора, наряду с магнитным полем АЭД, линейно зависит от функционального состояния машины [8–13].

### Способы анализа текущих значений тока статора

Нечеткая система полагается на набор правил. В настоящем исследовании фазные токи двигателя были проанализированы на основе последующей тенденции их изменения и по значениям тока была сделана оценка технического состояния двигателя.

Нечеткие правила и функции принадлежности сформированы посредством анализа набора данных. Для измерений, связанных с токами статора, функции принадлежности будут сгенерированы для входной переменной – ток каждой фазы статора (ОВ – отрицательно высокий, Н – нулевой, ПВ – положительно высокий)

вычисляющийся как  $(I_{\text{тек}} + I_{\text{ном}}) / 2I_{\text{ном}}$  (рис. 2). Выходное состояние двигателя: исправное, поврежденное, авария (рис. 3).

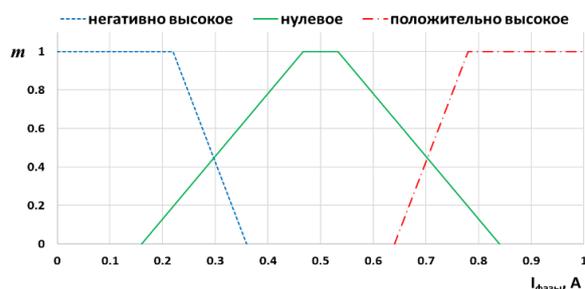


Рис. 2. Универсальная функция принадлежности фазных токов статора

Fig. 2. Universal accessory function for stator winding currents

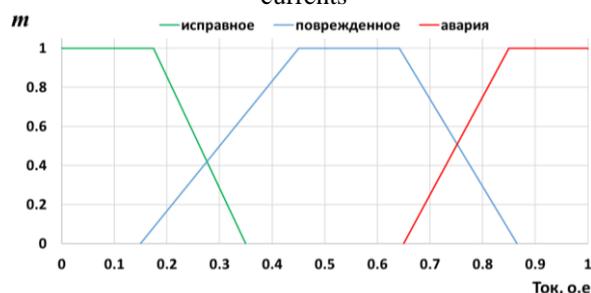


Рис. 3. Выходная функция принадлежности

Fig. 3. The final function of the accessory

На этой основе определим набор правил:

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)  
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)  
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is H) and (B is H)  
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)  
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then (OUT is исправное),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)  
 then (OUT is авария),

If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then (OUT is поврежденное),

If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)  
 then (OUT is Normal),

If (A is H) and (C is HB) and (B is H)  
 then (OUT is авария),

If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)

then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is H) and (B is HB)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is H) and (B is H)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is H) and (B is HB)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is HB) and (B is H)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is H) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is поврежденное),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is Normal),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is поврежденное),  
 If (A is HB) and (Y is H) and (B is HB)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is HB) and (C is H) and (B is H)  
 then(OUT is авария),  
 If (A is HB) and (C is H) and (B is HB)  
 then(OUT is поврежденное),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is поврежденное),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is H)  
 then(OUT is поврежденное),  
 If (A is HB) and (C is HB) and (B is HB)  
 then(OUT is поврежденное).

Для входной и выходной функции принадлежности, которая в первом случае исполь-

зуется для каждого входного тока статора, а во втором – для АЭД в целом, выберем диапазон от 0 до 1.

Для перехода выходного значения из лингвистического вида в абсолютный применяем метод центра тяжести, имеющий наибольшее распространение при решении практических задач [14–16]. Данный метод использует в качестве значения выходной переменной координату (по оси абсцисс) центра тяжести площади результирующего терм-множества выходной лингвистической переменной, вычисляемой по формуле [4, 6]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^k i_x d\mu_x(i)}{\sum_{i=1}^k \mu_x(i)}.$$

Для разработанных правил и выбранных диапазонов входных и выходных функций принадлежности применим веса состояний, приведенных в табл. 3.

Рассмотрим реакцию системы, разработанной на базе аппарата нечеткой логики, на различные входные данные состояния. В качестве входных данных использовались сведения, полученные при конечно-элементном моделировании электродвигателя АИР63В4 [17, 18], работающего с номинальной нагрузкой на валу. Экраны состояний, полученные в среде MatLab [19] для различных режимов работы, приведены на рис. 4–7.

**Таблица 3.** Состояния асинхронного электродвигателя в зависимости от значения нечеткого множества  
**Table 3.** Motor states depending on the value of the fuzzy set

Состояние асинхронного электродвигателя Motor states	Диапазон значений Range of values
Хорошее состояние Good condition	0,53–0,6
Несимметрии тока в одной фазе (или обрыв) Current asymmetry in one phase (or open surcuit)	0,15–0,25
Дефекты ротора (обрыв стержней на стрижни) Rotor defects (breakage of rods)	0,05–0,135
Несимметрия напряжения в фазах или короткое замыкание в обмотке статора Voltage asymmetry in the phases or short circuit in the stator winding	0,25–0,5
Перенапряжение, перегрузка, малые межвитковые замыкания Overvoltage, overload, small turn-to-turn faults	0,6–0,8
Межвитковое замыкание в обмотке статора Interturn short circuit in the stator winding	Более 0,8 More than 0,8
Неизвестно Unknown	Менее 0,05 less than 0,05

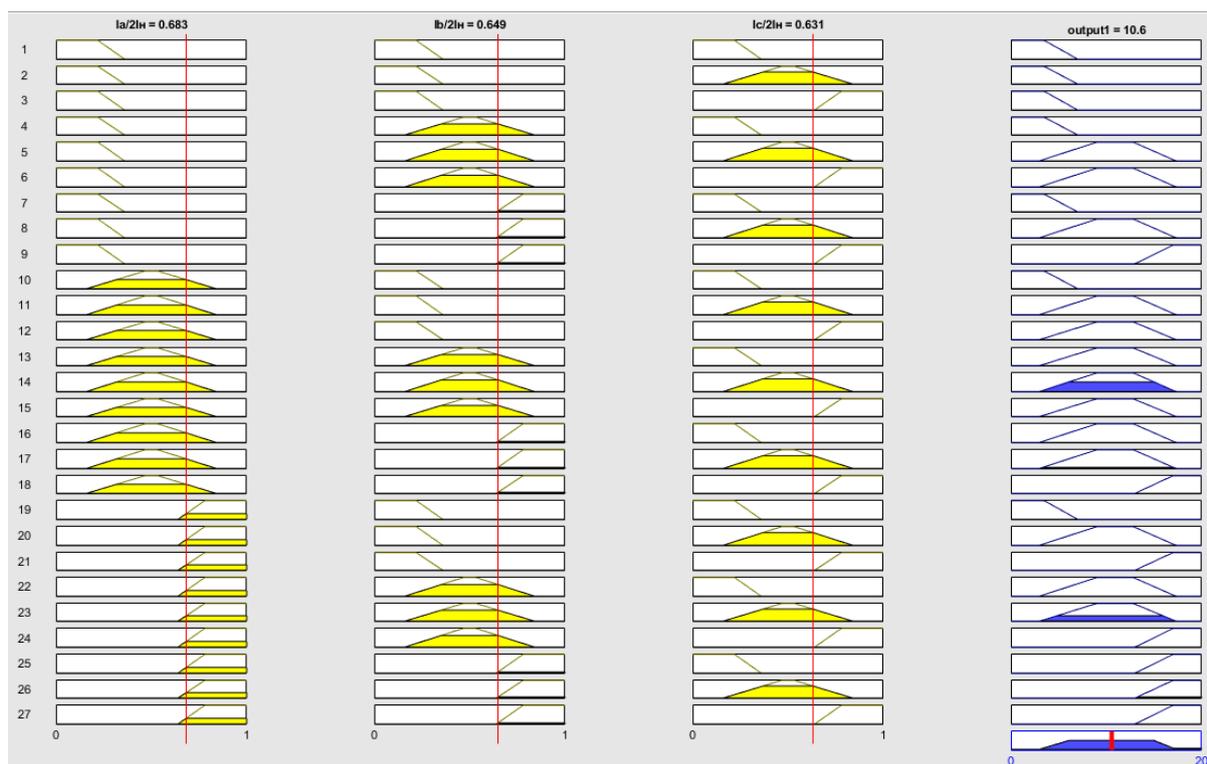


Рис. 4. Экран состояния бездефектного асинхронного электродвигателя

Fig. 4. Defect-free status screen induction motor

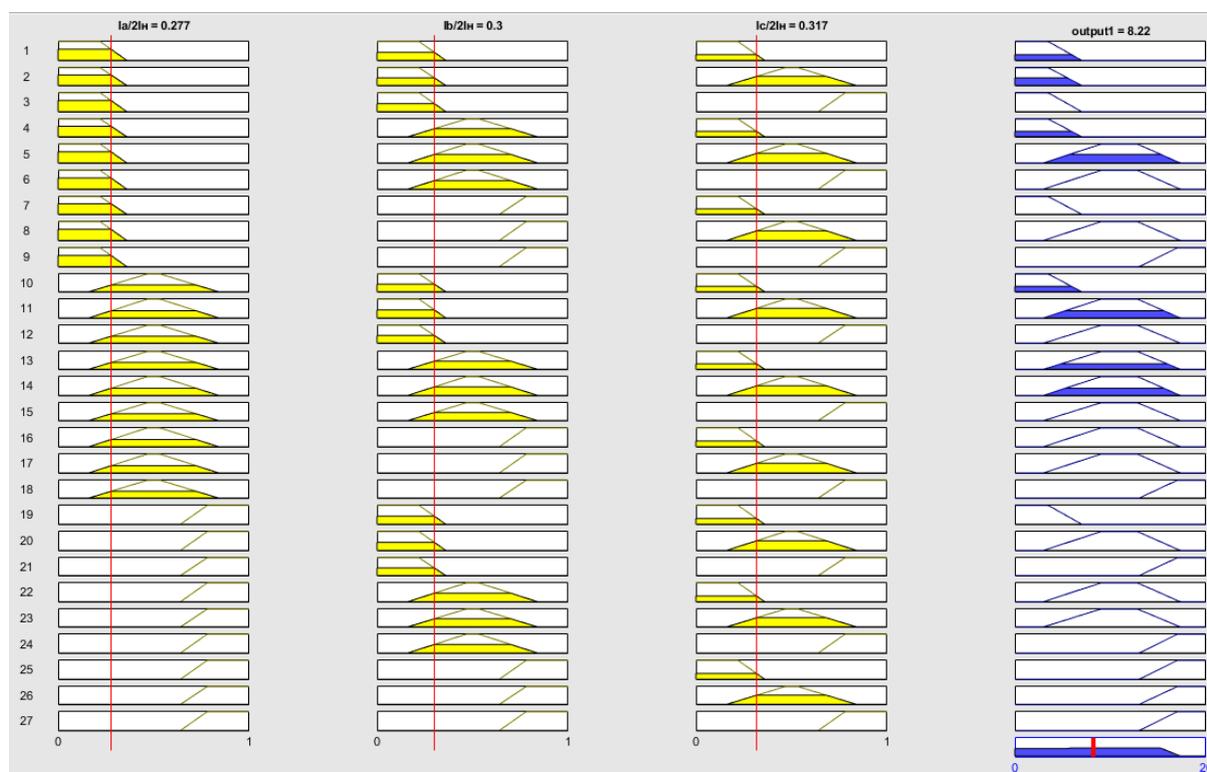
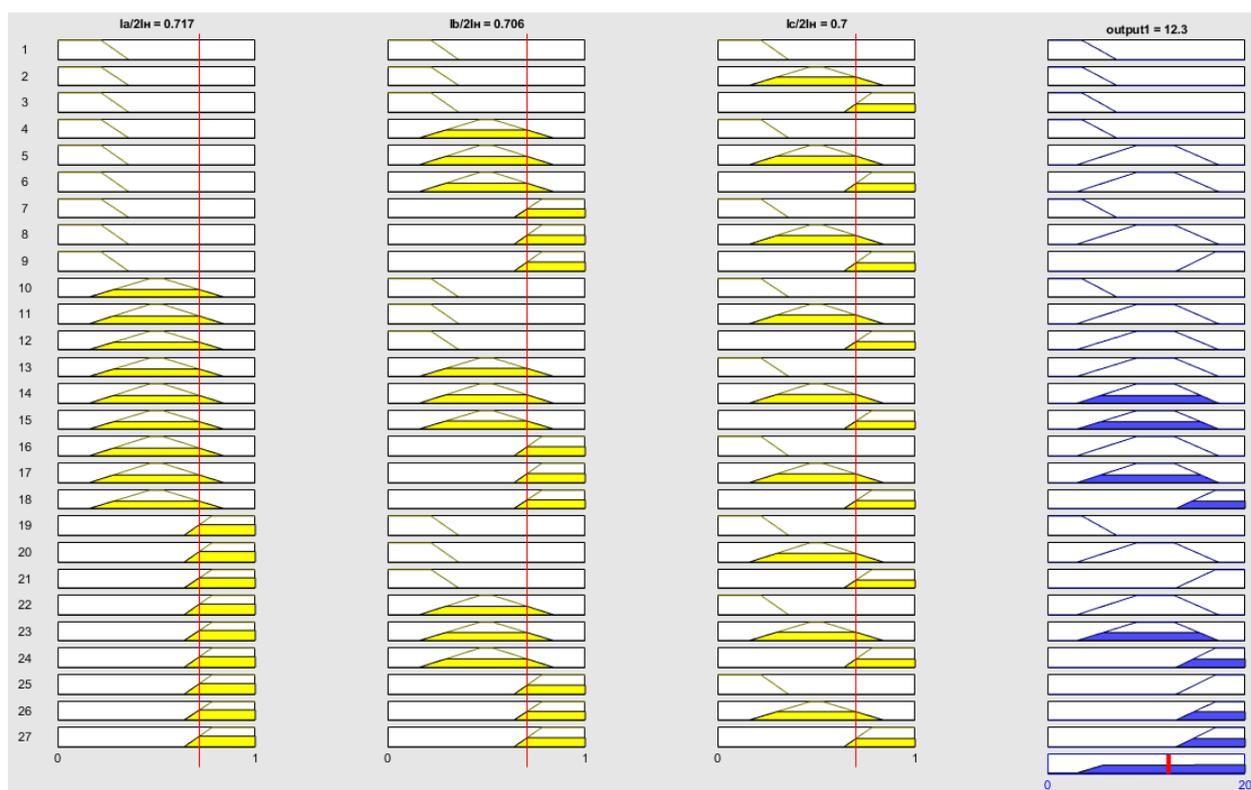


Рис. 5. Экран состояния асинхронного электродвигателя при несимметрии напряжения в фазах или коротком замыкании в обмотке фазы статора

Fig. 5. The induction motor status screen with voltage asymmetry in phases or short circuit in the stator winding



**Рис. 6.** Экран состояния асинхронного электродвигателя при перенапряжении и перегрузке  
**Fig. 6.** The induction motor status screen in case of overvoltage and overload



**Рис. 7.** Экран состояния асинхронного электродвигателя при коротком замыкании в обмотке статора  
**Fig. 7.** The status screen of the induction motor in case of an inter-turn short circuit in the stator winding

**Возможность анализа частотного состава**

Таким образом, модель, основанная на анализе текущих значений тока в фазах статора, имеет недостаток, который можно назвать перекрытием диагнозов, т.е. имеются некоторые значения выходной функции принадлежности, которые могут интерпретироваться как разные дефекты.

Как один из способов повышения точности постановки диагноза можно использовать дополнительный метод контроля с высокой степенью дифференциации по видам дефектов. В частности, анализ механических колебаний дает жесткую связь между током статора и магнитным полем АЭД [20].

Связь между током в статоре, внешним магнитным полем и вибрацией машины можно описать выражениями радиальных и тангенциальных колебаний:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} \cdot b^2(\vartheta, t),$$

$$p_\tau = a(\vartheta, t) \cdot b(\vartheta, t),$$

где  $b(\vartheta, t) = f(\vartheta, t)\Lambda(\vartheta, t)$  – магнитная индукция в воздушном зазоре в точке с угловой координатой  $\vartheta$  в момент времени  $t$  ( $f(\vartheta, t)$ ;  $\Lambda(\vartheta, t)$  – мгновенные значения результирующей МДС обмоток статора и ротора и магнитной проводимости зазора);  $t$  – текущие время;  $\vartheta$  – угловая координата [20].

В случае анализа разнообразного частотного состава гармоник вибрации поврежденного или неисправного АЭД в качестве входных переменных будем рассматривать:

- наличие частот, связанных с особенностями конструкции машины, а именно модуляции гармоник пазовых частот статора и ротора электромагнитной частотой  $2f_c = 100$  Гц;
- гармоники оборотной частоты;
- вклад каждого семейства указанных частот в общий уровень вибрации.

Для измерений, связанных с частотным составом, функции принадлежности будут введены для двух входных переменных: вклад каждого семейства частот в общий уровень вибрации ( $Q_{PAZ}$  – пазовые частоты,  $Q_{SLIP}$  – оборотные частоты).

– вклад каждого семейства частот в общий уровень вибрации ( $Q_{PAZ}$  – пазовые частоты,  $Q_{SLIP}$  – оборотные частоты).

Дополнительно используется результат работы системы при анализе действующих зна-

чений тока в фазах статора или внешнего магнитного поля в трех точках, сдвинутых на межполюсное деление ( $Q_{CURR}$ ).

Для упрощения вычислений будем рассматривать гармоники, имеющие амплитуду не менее 20 % от амплитуды гармоники электромагнитной частоты АЭД  $2f_c = 100$  Гц.

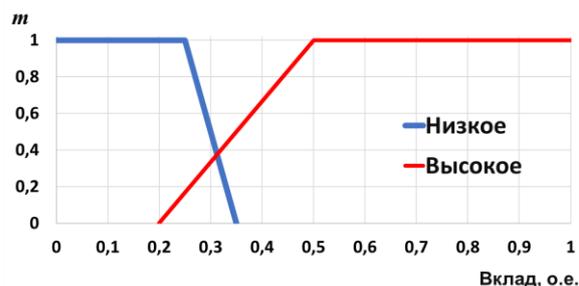
В качестве корректирующего коэффициента  $k$ , повышающего значение входной переменной, примем количество гармоник семейства пазовых и оборотных частот.

Тогда основным выражением для вычисления входной переменной будет:

$$\frac{P_{f(x)}}{P_{sym}} \cdot k,$$

где  $p_{f(x)}$  – сумма амплитуд гармоник выбранного семейства  $k$ ;  $p_{sym}$  – общий уровень вибрации машины.

Входное состояние для каждого семейства частот будет описываться как Н – низкое и В – высокое (рис. 8).



**Рис. 8.** Универсальная функция Принадлежности для семейств гармоник  
**Fig. 8.** Universal membership function for harmonic families ( $Q$ )

Выходную функцию оставим неизменной. Для составления системы правил воспользуемся известными справочными данными [21]. Ниже представлен набор правил для случаев эксцентриситета и межвиткового замыкания:

If and ( $Q_{CURR}$  is исправное) and ( $Q_{PAZ}$  is Н) and ( $Q_{SLIP}$  is Н) and then (OUT is исправное),

If ( $Q_{CURR}$  is поврежденное) and ( $Q_{PAZ}$  is Н) and ( $Q_{SLIP}$  is Н) then (OUT is исправное),

If  $Q_{CURR}$  is поврежденное) and ( $Q_{PAZ}$  is В) and ( $Q_{SLIP}$  is Н) then (OUT is поврежденное),

If ( $Q_{CURR}$  is поврежденное) and ( $Q_{PAZ}$  is В) and ( $Q_{SLIP}$  is Н) then (OUT is поврежденное),

If ( $Q_{CURR}$  is авария) and ( $Q_{PAZ}$  is В) and

$(Q_{SLIP} \text{ is B})$  then  $(OUT \text{ is авария})$ ,  
 If  $(Q_{CURR} \text{ is авария})$  and  $(Q_{PAZ} \text{ is B})$  and  
 $(Q_{SLIP} \text{ is H})$  then  $(OUT \text{ is исправное})$ ,  
 If  $(Q_{CURR} \text{ is авария})$  and  $(Q_{PAZ} \text{ is H})$  and  
 $(Q_{SLIP} \text{ is B})$  and then  $(OUT \text{ is исправное})$ ,  
 If  $(Q_{CURR} \text{ is авария})$  and  $(Q_{PAZ} \text{ is H})$  and  
 $(Q_{SLIP} \text{ is H})$  then  $(OUT \text{ is авария})$ ,  
 If  $(Q_{CURR} \text{ is авария})$  and  $(Q_{SLIP} \text{ is H})$  then  
 $(OUT \text{ is авария})$ ,  
 If  $(Q_{CURR} \text{ is авария})$  and  $(Q_{PAZ} \text{ is H})$  then  
 $(OUT \text{ is авария})$ .

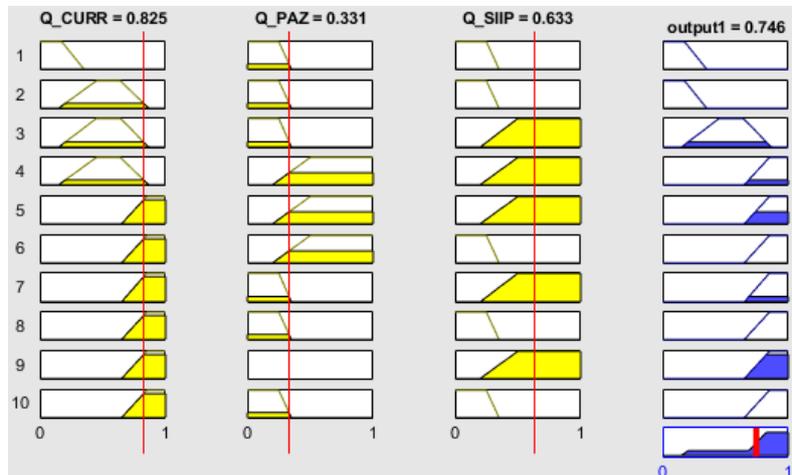
Для проверки реакции системы воспользуемся данными, полученными с конечно-элементной модели для токов фаз статора. Для вибрации воспользуемся сведениями, полученными в ходе эксперимента по измерению горизонтальной составляющей вибрации.

Экраны состояния для режима работы при наличии эксцентриситета ротора и межвитковом замыкании приведены на рис. 9 и 10.

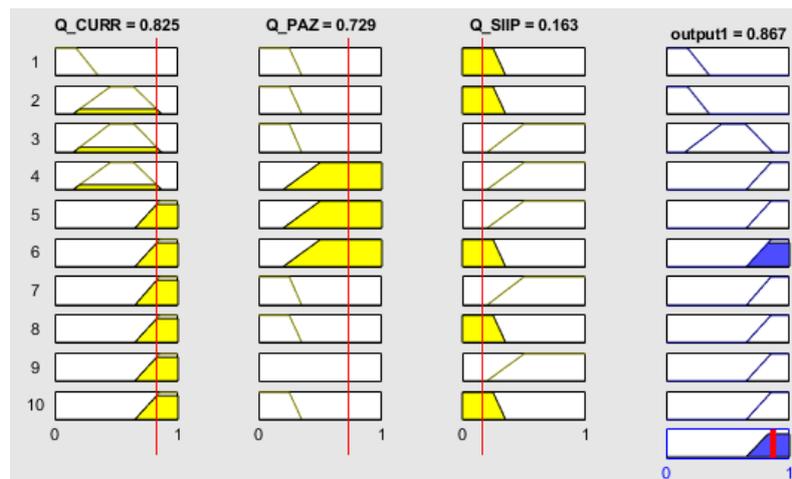
Таким образом, добавление дополнительных входных переменных, связанных с анализом частотного состава механических колебаний, изменяет результирующее показание системы. Это позволяет улучшить дифференциацию диагнозов, получаемых системой.

В данном случае в диапазоне значений от 0,8 до 1 дополнительным делением интервала на два отрезка – 0,75–0,825 (эксцентриситет ротора) и 0,825–1 (межвитковое замыкание) – дифференцировать механические и электрические дефекты.

### Заключение



**Рис. 9.** Экран состояния асинхронного электродвигателя при эксцентриситете ротора  
**Fig. 9.** The status screen of the induction motor under the rotor eccentricity



**Рис. 10.** Экран состояния асинхронного электродвигателя при межвитковом замыкании в обмотке статора при добавлении в систему анализа частотного состава вибрации  
**Fig. 10.** The status screen of the induction motor in case of an inter-turn short circuit in the stator winding when the frequency composition of vibration is added to the analysis system

Методология диагностики АЭД по фактическому состоянию может быть разработана на основе анализа таких параметров, как механические колебания, величина тока в обмотках статора и внешнее магнитное поле, что позволяет не вносить дополнительные изменения в конструкцию оборудования. При этом сохраняется достаточно высокая достоверность постановки диагноза с учетом состояния АЭД.

Использование аппарата нечеткой логики дает возможность проведения диагностики АЭД в режиме реального времени и ее автоматизации. Также возможна быстрая модификация системы благодаря легкости формирования правил, что снизит время постановки первичного диагноза и увеличит его достоверность, в том числе и для специализированных АЭД.

Разработанный алгоритм на основе анализа текущих значений тока в обмотках статора показывает хорошую реакцию на наличие электрических дефектов и точно определяет ис-

правное состояние АЭД даже при предельной паспортной нагрузке. Дефекты электрической сети дополнительно могут определяться с удовлетворительной достоверностью, за исключением предельных случаев. Достоинством данной системы также является возможность замены тока в качестве параметров состояния на напряженность внешнего магнитного поля с сохранением соотношений  $(B_{\text{тек}} + B_{\text{ном}}) / 2B_{\text{ном}}$ .

Предлагаемая система позволяет дифференцировать виды основных электрических дефектов и степень их развития.

Проверена возможность включения в параметры состояния АЭД частотного состава спектров вибрации. В частности, рассмотрен случай использования в качестве параметров состояния вклада гармоник семейства пазовых и оборотных частот в общий уровень вибрации электродвигателя. В результате появилась возможность разделения механических и электрических дефектов АЭД.

### Список литературы

1. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск : ИрГТУ, 2000. 229 с.
2. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // *IEEE transactions on energy conversion*. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32–37. DOI 10.1109/TEC.2005.847955.
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования : с изм. и доп. от 01.03.2001. М. : НЦ ЭНАС, 2004. 256 с.
4. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М. : Мир, 1976. 165 с.
5. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // *Математика сегодня*. М. : Знание, 1974. С. 5–49.
6. Chow M.-Y., Bi L., Goddu G. Intelligent motor fault detection // *Intelligent Techniques in Industry*. Boca Raton FL: CRC Press, 1998. 352 p.
7. Исследование угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя при дефектах / А.В. Лукьянов, И.О. Бельский, И.С. Куприянов и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой междунар. науч.-практ. конф.* Иркутск, 2018. Т. 2. С. 455–460.
8. Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Техническая диагностика объектов с использованием методов нечеткой логики // *Радиотехника*. 2017. № 6. С. 32–34.
9. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, Is. 12. P. 4109–4126.
10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
11. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999. Vol. 14, Is. 4. P. 1065–1074.
12. Никиян Н.Г., Митрофанов С.В., Омон А.Б. Электромагнитные процессы и токи трехфазного асинхронного двигателя при межвитковых коротких замыканиях // *Электричество*. 2010. № 5. С. 53–56.
13. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. Кемерово : КузГТУ, 2005. 139 с.
14. Incipient fault detection in induction machine stator-winding using a fuzzy-Bayesian two change points detection approach / F.S. Moreira, M.F.S.V. D'Angelo, R.M. Palhares et al. // *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2010)*. Sao Paulo, 2010. P. 1–6.
15. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. М. : Знание, 1976. 56 с.
16. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. М. : Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
19. Кетков Ю.Л. Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7 – программирование, численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
20. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
21. Неразрушающий контроль и диагностика / под ред. В.В.Клюева. М. : Машиностроение, 2005. 656 с.

## References

1. Luk'yanov A.V. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem rotornykh mashin (sistema planovo-diagnosticheskogo remonta) [Management of the technical condition of rotary machines (system of scheduled diagnostic repair)]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2000. 229 p.
2. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
3. RD 34.45-51.300-97. Ob'em i normy ispytaniya elektrooborudovaniya (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 01.03.2001) [RD 34.45-51.300-97. Scope and standards of testing of electrical equipment (with amendments and additions as of March 01, 2001)]. Moscow: NTs Enas Publ., 2004. 256 p.
4. Zadeh L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning]. Moscow: Mir Publ., 1976. 165 p.
5. Zadeh L.A. Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov prinyatiya reshenii [Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes]. *Matematika segodnya* [Mathematics today], 1974, pp. 5–49.
6. Chow M.-Y., Bi L., Goddu G. «Intelligent motor fault detection» in Intelligent Techniques in Industry. Boca Raton FL: CRC Press, 1998.
7. Luk'yanov A.V., Bel'skii I.O., Kupriyanov I.S., Nazarov A.V. Issledovanie uglovoi skorosti vrashcheniya rotora asinkhronnogo dvigatelya pri defektakh [Investigation of the angular velocity of rotation of the rotor of an induction motor with defects]. *Materialy Devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 455–460.
8. Kuvaiskova Yu.E., Aleshina A.A. Tekhnicheskaya diagnostika ob'ektov s ispol'zovaniem metodov nechetkoi logiki [Technical diagnostics of objects using fuzzy logic methods]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2017, no. 6, pp. 32–34.
9. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.-A. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126.
10. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
11. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
12. Nikiyan N.G., Mitrofanov S.V., Omon A.B. Elektromagnitnye protsessy i toki trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri mezhvitkovykh korotkikh zamykaniyakh [Electromagnetic processes and currents of a three-phase asynchronous motor with inter-turn short circuits]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 5, pp. 53–56.
13. Kashirskikh V.G. Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigatelyei [Dynamic identification of asynchronous electric motors]. Kemerovo: KuzGTU Publ., 2005. 139 p.
14. Moreira F.S., D'Angelo M. F. S. V., Palhares R.M., Caminhas W.M. Incipient fault detection in induction machine stator-winding using a fuzzy-Bayesian two change points detection approach. *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010*. Sao Paulo, 2010, pp. 1–6.
15. Gol'dberg O.D. Nadezhnost' elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo i bytovogo naznacheniya [Reliability of electrical machines for general industrial and household purposes]. Moscow: Znanie Publ., 1976. 56 p.
16. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965, vol. 8, pp. 338–353.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya E.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
19. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M. MATLAB 7 – programmirovaniye, chislennyye metody [MATLAB 7 – programming, numerical methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2005. 752 p.
20. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Ehnergoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
21. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics] / Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 656 p.

## Информация об авторах

**Куприянов Иван Сергеевич**, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: xpress14@mail.ru.

**Лукьянов Анатолий Валерианович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.

## Information about the authors

**Ivan S. Kupriyanov**, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.

**Anatolii V. Luk'yanov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.